

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Marko Vlahov**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Student:

Marko Vlahov

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, doc.dr.sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem asistentu mag.ing Jozefu Tuniću na pomoći i savjetima tijekom izrade rada, te se zahvaljujem laborantima katedre za zavarivanje pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci na razumijevanju i pruženoj potpori tijekom studiranja.

Marko Vlahov

---



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne  
simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA .....	VI
1. UVOD.....	1
2. Podjela, svojstva i zavarljivost čelika otpornih na koroziju .....	2
2.1. Austenitni nehrđajući čelici .....	3
2.2. Feritni nehrđajući čelici .....	6
2.3. Martenzitni nehrđajući čelici .....	8
2.4. Dupleks nehrđajući čelici.....	10
3. TIG postupak zavarivanja.....	11
3.1. Oprema i parametri zavarivanja .....	12
3.1.1. Parametri zavarivanja.....	12
3.1.2. Izvori struje .....	13
3.1.3. Pištolj za zavarivanje .....	15
3.1.4. Elektrode i zaštitni plinovi .....	17
4. Eksperimentalni dio .....	20
4.1. Oprema.....	21
4.2. Osnovni i dodatni materijal.....	24
4.3. Plan pokusa .....	26
4.4. Rezultati .....	40
5. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA.....	65

## POPIS SLIKA

Slika 1. Napetosna korozija austenitnog čelika kvalitete AISI 304 [12] .....	5
Slika 2. Shema TIG postupka [16] .....	11
Slika 3. Primjer izvora struje za TIG zavarivanje [16] .....	14
Slika 4. Varijante TIG pištolja za zavarivanje [8].....	16
Slika 5. Shema TIG pištolja za zavarivanje [7].....	16
Slika 6. Prikaz volfram elektroda za zavarivanje [19] .....	17
Slika 7. Prikaz uređaja za zavarivanje.....	21
Slika 8. Prikaz pištolja za zavarivanje.....	21
Slika 9. Impulsna struja zavarivanja .....	23
Slika 10. Priprema rubnog spoja .....	26
Slika 11. Priprema T-spoja.....	27
Slika 12. Priprema rubnog spoja .....	27
Slika 13. Priprema rubnog spoja uzorka 2a, 2b, 2g i 2h .....	29
Slika 14. Priprema preklopnog spoja uzorka 2c, 2d, 2i i 2j.....	31
Slika 15. Priprema T-spoja uzorka 2e, 2f, 2k i 2l.....	33
Slika 16. Priprema rubnog spoja uzorka 3a, 3b, 3g i 3h.....	35
Slika 17. Priprema preklopnog spoja uzorka 3c, 3d, 3i i 3j.....	37
Slika 18. Priprema T-spoja uzorka 3e, 3f, 3k i 3l.....	39
Slika 19. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 2a i 2b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	40
Slika 20. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 2g i 2h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika.....	41
Slika 21. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 2c i 2d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	44
Slika 22. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 2i i 2j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika.....	45
Slika 23. Uzorci zavarivanja T-spoja 2e i 2f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	48
Slika 24. Uzorci zavarivanja T-spoja 2k i 2l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika.....	49

Slika 25. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 3a i 3b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	52
Slika 26. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 3g i 3h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika.....	53
Slika 27. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 3c i 3d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	56
Slika 28. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 3i i 3j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika.....	57
Slika 29. Uzorci zavarivanja T-spoja 3e i 3f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	60
Slika 30. Uzorci zavarivanja T-spoja 3k i 3l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika.....	61

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste struja i polaritet elektrode kod TIG zavarivanja [7] .....	13
Tablica 2. Vrste pištolja za zavarivanje u ovisnosti o jakosti struje [7] .....	15
Tablica 3. Klasifikacija elektroda [7] .....	18
Tablica 4. Tehnički podatci uređaja ESS 211 DTG [11] .....	22
Tablica 5. Oznake čelika AISI 304 prema različitim standardima [17] .....	24
Tablica 6. Udio legirnih elemenata [13] .....	24
Tablica 7. Tehnički podatci od čeliku AISI 304 [13] .....	25
Tablica 8. Udjeli legirnih elemenata u dodatnom materijalu [14] .....	25
Tablica 9. Parametri zavarivanja uzoraka 2a i 2b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	28
Tablica 10. Parametri zavarivanja uzoraka 2g i 2h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika .....	28
Tablica 11. Parametri zavarivanja uzoraka 2c i 2d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	30
Tablica 12. Parametri zavarivanja uzoraka 2i i 2j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika .....	30
Tablica 13. Parametri zavarivanja uzoraka 2e i 2f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	32
Tablica 14. Parametri zavarivanja uzoraka 2k i 2l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika .....	32
Tablica 15. Parametri zavarivanja uzoraka 3a i 3b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	34
Tablica 16. Parametri zavarivanja uzoraka 3g i 3h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika .....	34
Tablica 17. Parametri zavarivanja uzoraka 3c i 3d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	36
Tablica 18. Parametri zavarivanja uzoraka 3i i 3j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika .....	36
Tablica 19. Parametri zavarivanja uzoraka 3e i 3f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona .....	38



Tablica 20. Parametri zavarivanja uzoraka 3k i 3l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika .....	38
Tablica 21. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 2a, 2b, 2g i 2h.....	42
Tablica 22. Usporedba brzina zavarivanja uzoraka .....	42
Tablica 23. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 2c, 2d, 2i i 2j .....	46
Tablica 24. Usporedba brzina zavarivanja uzoraka .....	46
Tablica 25. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 2e, 2f, 2k i 2l .....	50
Tablica 26. Usporedba brzina zavarivanja .....	50
Tablica 27. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 3a, 3b, 3g i 3h.....	54
Tablica 28. Usporedba brzina zavarivanja .....	54
Tablica 29. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 3c, 3d, 3i i 3j .....	58
Tablica 30. Usporedba brzina zavarivanja .....	58
Tablica 31. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 3e, 3f, 3k i 3l .....	62
Tablica 32. Usporedba brzina zavarivanja .....	62

**POPIS KRATICA**

AISI	American Iron and Steel Institute
ZUT	Zona utjecaja topline
BCC	Body centered cubic
FCC	Face centered cubic
PREN	Pitting resistance equivalent number
TIG	Tungsten inert gas
GTAW	Gas tungsten arc welding
WIG	Wolfram inert gas
DCEN	Direct current electrode negative
DCEP	Direct current electrode positive
HRN EN	Hrvatske norme
W. Nr	Werkstoffnummer
UNS	Unified Numbering System
AFNOR	Association French Normalization Organization Regulation
B.S.	British Standard
AOD	Argon oxygen decarburization

## 1. UVOD

Nehrđajući čelici su važan dio strojarskih materijala koji se široko koriste u različitim industrijama i okolinama. Zavarivanje je važan postupak za proizvodnju i montažu konstrukcija od nehrđajućeg čelika.

Nehrđajući čelici su materijali s dobrom zavarljivošću, ali dosta se pravila mora poštivati da kako bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta spoja bez grešaka ili defekata. Obično se problemi javljaju zbog loše mikrostrukture zavara ili zbog lošeg odabira postupaka za određeni materijal tj. njegovu mikrostrukturu.

Ovaj rad obrađuje problematiku zavarivanja nehrđajućih čelika TIG postupkom zavarivanja.

U sklopu rada napravljen je eksperimentalni zadatak zavarivanja karakterističnih spojeva austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 304. Zavareni su rubni, kutni T-spoj, te preklopni spoj kontinuiranim i impulsnim strujama. Primjenjuje se zaštitna atmosfera argona i mješavina argona i 5% vodika.

Nakon toga provedena je analiza zavarenih uzoraka da se dobije uvid u ovisnost parametara zavarivanja o vrstama struja i zaštitnim atmosferama.

## 2. Podjela, svojstva i zavarljivost čelika otpornih na koroziju

Visokolegirani čelici svoj razvoj i primjenu počinju početkom 20. stoljeća. Patentirao ih je 1912. poznati proizvođač čelika Krupp. Industrijska proizvodnja tih materijala i njihova primjena počinje već 1914. godine. [1]

Istodobno, u razdoblju od 1910. do 1915. godine, navodi se da je Harry Bready iz Sheaffielda u Engleskoj proizvodio prvi pribor za jelo od visokolegiranog čelika. [1]

Iz tog razdoblja pa sve do danas, ti su se materijali intenzivno razvijali, ovisno o potrebama primjene, naročito u petrokemijskoj industriji. Primjenom su nastajali i problemi, od kojih su za ovaj rad posebno zanimljive poteškoće koje se mogu pojaviti kao posljedica zavarivanja tih materijala.

Podjela visokolegiranih nehrđajućih čelika je raznolika i neujednačena. Koriste se podjele materijala prema strukturi, gdje su glavne grupe [2]:

- feritni čelici,
- martenzitni čelici,
- austenitni čelici i
- feritno austenitni tj. dupleks čelici.

Detaljna podjela čelika, s obzirom na njihovu strukturu [2]:

- feritni Cr-čelici,
- martenzini Cr-čelici,
- mekani martenzitni Cr-Ni čelici,
- feritno-austenitni (dupleks) Cr-Ni-Mo-N čelici,
- austenitni Cr-Ni(Mo)-čelici s udjelom ferita do 15% i
- austenitni Cr-Ni(Mo)-čelici bez ferita ili visokoaustenitizirani čelici.

## 2.1. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni čelici su zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre mogućnosti obrade, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava, te estetskih karakteristika najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije i građevinarstvu za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta. [12]

Austenitni nehrđajući čelik korišten u eksperimentalnom dijelu ovog rada je AISI 304 W.Nr 1.4301). To je legura na osnovi željeza koja sadrži nominalno 18% kroma i 8.5% nikla, uključujući manje količine ugljika, dušika, mangana i silicija. Od osnovnog 18-8 austenitnog čelika razvijeno je desetak novih legura, a bazira se na dodavanju npr. molibdena i dušika zbog bolje otpornosti na koroziju. Austenitni čelici posjeduju visoku istezljivost i žilavost, a ta svojstva ovi čelici zadržavaju i pri sniženim temperaturama.

Austenitni korozijski postojani čelici smatraju se lakše zavarljivim od ostalih skupina korozijski postojanih Cr-Ni čelika iz razloga što kod njih ne nastupaju velike fazne (metalurške) transformacije. Zbog toga je moguće postići zavarene spojeve koji posjeduju svojstva slična onima osnovnog materijala i bez prethodnog zagrijavanja ili pak naknadne toplinske obrade.[12]

Njihovu upotrebu donekle otežava mogućnost pojave senzibilizacije prilikom postupka zavarivanja što za posljedicu može imati pojavu interkristalne korozije, fenomena koji se na zavarenim konstrukcijama javljao često u početnom razdoblju korištenja ovih materijala i ograničavao njegovu širu primjenu. Senzibilizacija se može izbjeći odabirom stabiliziranih čelika niskog sadržaja ugljika. Također, ovi materijali nerijetko su podložni i ostalim lokalnim korozijskim fenomenima (rupičasta, napetosna korozija u procjepu), stoga odabir pojedine vrste tj. kvalitete austenitnog nehrđajućeg čelika treba pažljivo izvršiti.

Iako su austenitni čelici iznimno zavarljivi podložni su raznim problemima pri zavarivanju ako se ne provedu odgovarajuće mjere opreza. [12]

Tople pukotine mogu nastati kao posljedica unosa nečistoća u metal zavara, posebno sumpora i fosfora. Unatoč dobroj otpornosti na koroziju može se pojaviti lokalizirana korozija na granicama zrna u ZUT-u ili kod koncentriranih naprezanja u zoni zavarenog spoja.

Dva su osnovna cilja prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika: postići zavare bez pukotina, te osigurati da zavar i ZUT imaju istu korozijsku postojanost kao i osnovni materijal.

Iako su ovi čelici s mnogo aspekata lakše zavarljivi, njihova austenitna mikrostruktura uzrokuje i neke potencijalne probleme, od kojih je najznačajnija pojava toplih pukotina tijekom skrućivanja metala zavara. Osjetljivost na ovakve pukotine je usko povezana s kemijskim sastavom. Metal zavara koji očvrsne u potpuno austenitnom stanju je najosjetljiviji na pukotine, dok onaj koji očvrsne u feritno – austenitnoj fazi je dosta otporniji na navedene pukotine. [3]

Visok udio nečistoća niskog tališta, spojevi fosfora, sumpora, bora, selen, niobija, silicija i titana, pojačava osjetljivost legura koje očvrsnu u austenitnoj ili austenitno – feritnoj fazi.

Izbjegavanje tj. minimiziranje opasnosti od pukotina se najjednostavnije i najučinkovitije postiže kontroliranjem sastava osnovnog i dodatnog materijala. Postižući očvršćivanje u obliku primarnog ferita, opasnost od pukotina se minimizira. Za većinu austenitnih nehrđajućih čelika ovo znači da se sastav mora kontrolirati da se postigne očvršćivanje u feritno – austenitnoj fazi. Općenito, legurni elementi poput nikla, tantala, silicija, titana, niobija i bakra povećavaju osjetljivost na pojavu toplih pukotina, dok elementi poput kroma, volframa, mangana i dušika umanjuju sklonost navedenoj pojavi.

### *Tople pukotine*

Nastaju zbog nečistoća koje su raspoređene po granicama zrna osnovnog materijala, u ZUT-u. Prilikom hlađenja zavarenog spoja, a zbog djelovanja naprezanja, dolazi do nastajanja toplih pukotina na mjestima gdje se nalaze nečistoće. Nečistoće su zbog utjecaja topline pri zavarivanju djelomično ili potpuno rastaljene. Dakle, u ZUT-u ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, ali zbog omekšavanja ili taljenja tankih slojeva filma nečistoće, dolazi do pada čvrstoće po granicama zrna.

Ovakve tople pukotine mogu se spriječiti kontroliranjem nečistoća u osnovnom materijalu.

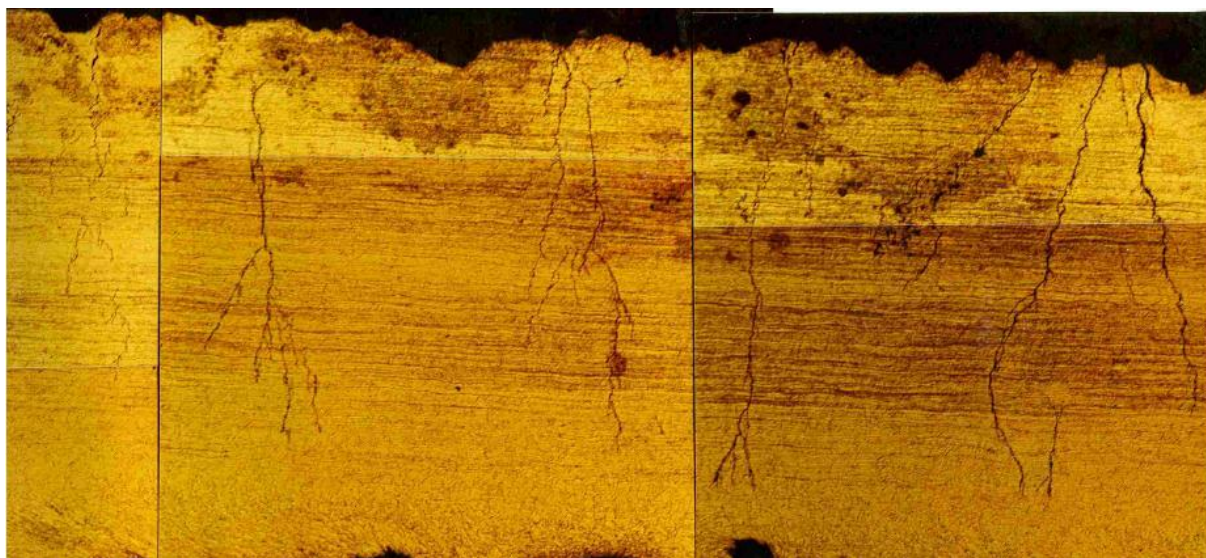
### *Pukotine zbog ponovnog zagrijavanja*

Pukotine zbog ponovnog zagrijavanja nisu uobičajene kod standardnih oblika austenitnih čelika, ali se mogu pojaviti u legurama koji formiraju karbide prilikom popuštanja zaostalih naprezanja.

Za vrijeme zavarivanja karbidi difundiraju u ZUT odmah do granice zone taljenja. Kada se zavar ponovo zagrije na vrijeme popuštanja, karbidi koji se nalaze unutar zrna ojačaju područje unutar zrna, dok je na granicama zrna čvrstoća puno manja, te uslijed popuštanja dolazi do pukotina po granicama zrna.[3]

### *Napetosna korozija*

Napetosna korozija je korozijski mehanizam u kojem kombinacija materijala, prisutnih vlačnih naprezanja i značajke medija dovode do pojave pukotina na materijalu. Napetosna korozija je vrlo složena pojava podložna utjecajima brojnih čimbenika, a napreduje transkristalno ili interkristalno. Ova vrsta korozije javlja se najčešće na hladno deformiranim lokalitetima ili u okolini zavarenih spojeva gdje su veća zaostala naprezanja i strukturne promjene. Austenitni Cr-Ni čelici posebno su osjetljivi na ovaj tip korozije. U slučaju napetosne korozije kod austenitnih čelika pukotine su najčešće transkristalne. Slika 1.



**Slika 1. Napetosna korozija austenitnog čelika kvalitete AISI 304 [12]**

## 2.2. Feritni nehrđajući čelici

Legure iz ove skupine sadrže uobičajeno 11-17% Cr, te sa sadržajem ugljika manjim od 0,1% imaju feritnu strukturu na sobnoj temperaturi. Često im se još dodaje Mo za povećanje korozijske otpornosti, a Ti ili Nb za postizanje bolje zavarljivosti. Postotak kroma može biti čak do 30%.

Također se koriste u rafinerijskim postrojenjima, te postrojenjima za proizvodnju deterdženata, a od tih čelika se izrađuju razni ukrasni predmeti i dijelovi kućanskih aparata. Korozijska otpornost feritnih čelika se može povisiti dodatnim legiranjem sa Cr i Mo, ali pozitivno utječe i daljnje snižavanje udjela ugljika. Razvijeni su i čelici s vrlo niskim sadržajem intersticijskih elemenata ( $C+N \leq 0,04$ ), „superferitni“ čelici, koji imaju povišenu postojanost u uvjetima napetostne korozije, pitinga i lužnatih medija.[2]

Feritni nehrđajući čelici su skloni pojavi interkristalne korozije. Kod feritnih nehrđajućih čelika sposobnost rastvaranja C i N je vrlo mala, ali je nasuprot tome difuzija rastvorenih legirajućih i pratećih elemenata u BCC-strukturi bitno veća pri svakoj temperaturi u odnosu na FCC strukturu. Zbog toga su toplinski procesi aktivni, kao što je izlučivanje raznih precipitata ili rast zrna, puno brži i intenzivniji nego kod austenitnih čelika.[2]

Za feritne čelike je također karakteristično pogrubljenje zrna na temperaturama iznad 850 °C. Ovi čelici nemaju sposobnost naknadnog „dotjerivanja“ strukture putem toplinske obrade. Taj je problem posebno izražen kao posljedica zavarivanja u područjima ZUT-a gdje su tijekom zavarivanja bile visoke temperature.

Uz navedene specifičnosti za feritne čelike potrebno je još navesti sklonost stvaranju  $\delta$ -faze (FeCr) pri držanju u temperaturnom rasponu od 520° do 850°C. Pri tehnološkim operacijama valjanja, kovanja, zavarivanja mora se ponekad računati s prisutnošću te faze. Izlučivanje  $\delta$ -faze se može poput precipitata karbida ili nitrata dokazati svjetlosnom mikroskopijom. Ta intermetalna faza povećava čvrstoću i tvrdoću, a znatno snižava žilavost i otpornost koroziji.



Pojava „krhkosti 475“ javlja se pri duljem zadržavanju u temperaturnom rasponu od 350° do 520°C. Učinak je intenzivniji s povećanjem Cr u čeliku, a i ostalih  $\alpha$ -genih elemenata (na primjer Mo). U tom temperaturnom području javlja se pojava očvršćivanja i otvrdnjavanja koja se izražava kao tzv. „krhkost 475“. Ta pojava, o čijim se fizikalnim temeljima zna vrlo malo, posljedica je fine submikroskopske jednofazne segregacije koja se ne može ustanoviti svjetlosnom mikroskopijom. Rezultati nastanka „krhkosti 475“ su smanjenje duktilnosti, a povećanje čvrstoće i tvrdoće.[2]

Pri zavarivanju feritnih čelika ( $C \leq 0,12\%$ ) preporuča se predgrijavanje na 200-300°C i održavanje navedene međuslojne temperature.

Zbog pada žilavosti u području zavarenog spoja, savjetuje se primjena odgovarajućih austenitnih dodatnih materijala, kojima se u određenom smislu nadomješta narušena duktilnost. Dodatni materijali poboljšavaju i korozijsku postojanost zavarenog spoja.[2]

### 2.3. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni čelici obično sadrže krom u postotcima između 12 i 16%, a ugljik između 0,1 i 1%. Čelici martenzitnog tipa s relativno malim sadržajem ugljika (0,17 – 0,22% C, 12 – 14% Cr, oznake AISI 420) imaju čvrstoću od 650 do 950 N/mm<sup>2</sup>, a ovisno o toplinskoj obradi imaju tvrdoću 180 do 275 HB.[4]

Primjenjuju se za dijelove koji rade u vodi i vodenoj pari, npr. turbinske lopatice, osovine, vretena, kugle i sjedišta u armaturi za vodu ili paru, za nehrđajuće kirurške instrumente.

Krom povećava zakaljivost čelika i do stvaranja martenzita dolazi i na malim presjecima, čak ako se hlađenje vrši na zraku. Razlog tome je veoma mala kritična brzina hlađenja, odnosno pretvorba austenita u martenzit. Zavarljivost je loša jer je veoma teško izbjeći zakaljivanje prijelazne zone. Tvrdoća martenzita i u ovom slučaju ovisi o sadržaju ugljika. Kod čelika s niskim sadržajem ugljika, martenzit je relativno istezljiv i ima razmjerno nisku tvrdoću. Stoga čelici s manjim sadržajem ugljika nisu toliko skloni stvaranju pukotina kao oni koji imaju više ugljika.

Vjerojatnost nastanka hladnih pukotina, naročito u posljednjoj fazi neprekinutog hlađenja (na temperaturama ispod 100 do 120°C), povećava se pri povećanom sadržaju vodika u metalu zavara.

U praksi se za izradu zavarenih konstrukcija iz martenzitnih čelika koriste materijali s manje od 0,15% C. Iznad tog sadržaja ugljika otvrdnjavanje i zaostale napetosti u području ZUT-a gotovo bezuvjetno dovode do nastanka pukotina. [2]

Za vrijeme zavarivanja temperatura u području izvođenja zavara ne smije se sniziti ispod temperature martenzitne pretvorbe. Kako bi se postigla žilavija struktura prijelazne zone i većim dijelom izbjegle napetosti, zavareni radni komad treba odžariti nakon zavarivanja.

Prilikom TIG zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika i u kombinaciji s drugim tipovima nehrđajućih čelika mogu se koristiti dodatni materijali od austenitnih čelika (AISI 308, 309, 310) da bi se dobio metal zavara veće čvrstoće. Razlike u mehaničkim svojstvima metala zavara, ZUT-u, te osnovnog metala, kao i moguće nuspojave nakon toplinske obrade moraju biti pažljivo razmotrene prije upotrebe raznorodnih dodatnih materijala u proizvodnji.[5]

Veliki afinitet između kroma i kisika može lako uzrokovati stvaranje debelih oksidnih slojeva u talini zavara prilikom zavarivanja. Stoga kromovi oksidi koji se lako stvaraju u zavarenom spoju, smanjuju njegovu kvalitetu. Ova pojava iziskuje nužnost da se odabere postupak i tehnika zavarivanja koji daju dobro zaštićenu talinu zavara i električni luk od zraka.

Krom također ima izraženi afinitet prema ugljiku. Ovo uzrokuje jaku naklonost visokolegiranog čelika k stvaranju karbida prilikom zavarivanja, ukoliko postoji mogućnost da ugljik uđe u rastaljeni metal ili ukoliko se ugljik nađe u atmosferi električnog luka. Kod najvećeg broja nehrđajućih čelika poželjno je da sadržaj ugljika bude što niži.

Važno je naglasiti da kod svih postupaka zavarivanja treba odstraniti ulje, masti i slične stvari s površine pripreme zavarenog spoja, jer i one mogu izazvati povećani sadržaj ugljika.

## 2.4. Dupleks nehrđajući čelici

Dupleks nehrđajući čelici počinju se primjenjivati od 1930. g. razvitkom čelika kvalitete AISI 329. Iako tek 1970-ih ulaze u masovnu upotrebu zbog povećane upotrebe AOD postupka kojim je omogućena proizvodnja legura s izuzetno niskim udjelom ugljika te precizan nadzor nad sastavom legure tokom cijelog procesa proizvodnje. Struktura im je dvofazna i sastoji se od otprilike 50% ferita i 50% austenita.

Ovi čelici imaju povećanu otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju klorida, a imaju bolju otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Čvrstoća ovih čelika je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika. Dupleks nehrđajuće čelike moguće je podijeliti u tri generacije. Glavna razlika između prve i druge generacije je u tome da druga generacija sadrži namjerno dodan dušik, između 0,1 i 0,25%, dok je obilježje treće generacije  $PREN > 40$ . Pritom, PREN, tj. djelotvorna suma koja se često uzima u obzir kada se procjenjuje otpornost rupičastoj koroziji, računa se prema izrazu:

$$PREN = Cr + 3,3(Mo + 0,5W) + 16N \quad [3]$$

Oznaka dupleks se danas najčešće upotrebljava za čelike koji sadrže 22% Cr, a superdupleks za čelike sa sadržajem kroma 25%.

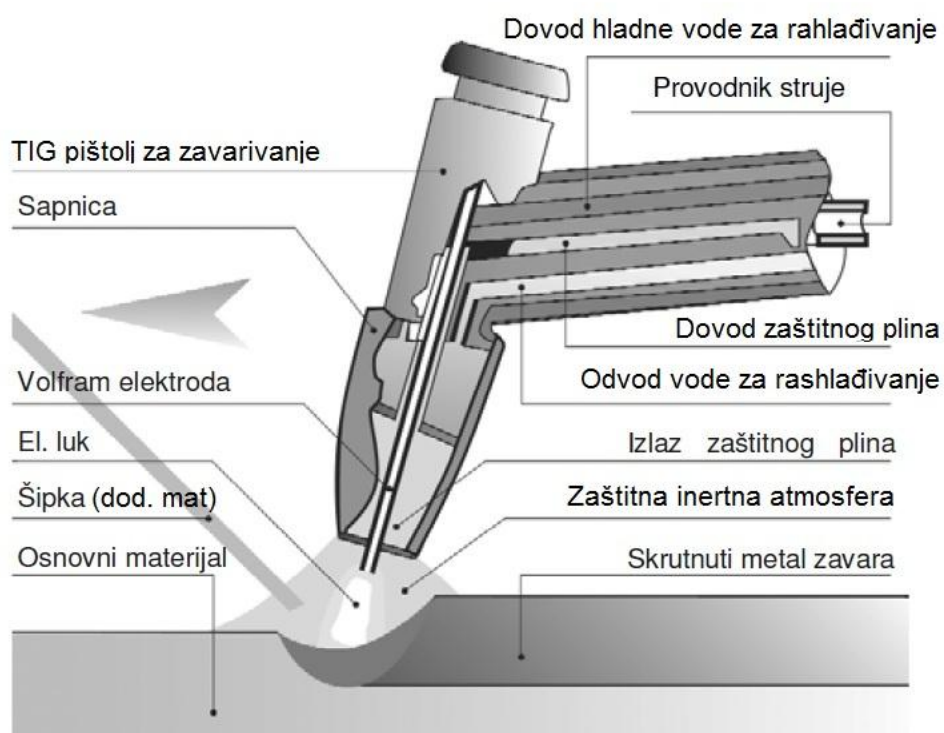
Razvojem odgovarajućih dodatnih materijala omogućena je dobra zavarljivost ovih materijala. Parametre zavarivanja valja tako odabrati da se ne poremeti omjer ferita i austenita i da ne dođe do segregacija i precipitata, što može smanjiti otpornost koroziji i pogoršati mehanička svojstva.

Kod veće količine unesene topline nužno je da se nakon zavarivanja provede rastvorno žarenje i gašenje.[3]

Većina problema nastalih kao posljedica zavarivanja ove skupine Cr-Ni čelika proizlazi iz feritne faze, koja čini približno 50% strukture legura ovog tipa zbog toga što ferit ima mnogo veću sklonost od austenita, da formira krhke intermetalne faze, kakve su npr. sigma faze, tijekom zadržavanja na povišenim temperaturama.

### 3. TIG postupak zavarivanja

TIG tehnologija zavarivanja, poznata i pod imenom GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ili WIG (Wolfram Inert Gas), je elektrolučni postupak zavarivanja gdje se topline oslobodjenom u električnom luku, koji se uspostavlja između elektrode načinjene iz volframa i radnog komada, tali osnovni, a po potrebi i dodatni materijal. Slika 2, [6]



Slika 2. Shema TIG postupka [16]

Energija potrebna za taljenje metala dovodi se pomoću električnog luka koji se održava između volframove elektrode i radnog komada pod zaštitom inertnog plina. Nehrđajući čelici se uvijek zavaruju s istosmjernom strujom (DC) s elektrodom na minus polu. U ovakvim uvjetima radni komad je na udaru elektrona, dok je elektroda, obično od volframa legiranog s torijevim oksidom (2%  $\text{TrO}_2$ ), otporna na trošenje. Dodatni materijal je obično u obliku šipke, za ručne ili u obliku namotane žice, za automatizirane postupke. Inertni plin, koji štiti ZUT od atmosferskih utjecaja, omogućuje jako stabilan električni luk. Ovisno o osnovnom materijalu zaštitni plin je argon (Ar), helij (He), te njihove kombinacije s vodikom (H) i dušikom (N). [7]

### 3.1. Oprema i parametri zavarivanja

#### 3.1.1. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja kod TIG zavarivanja su: [10]

- jakost struje zavarivanja [A],
- brzina zavarivanja [mm/min],
- promjer elektrode [mm],
- promjer dodatnog materijala [mm],
- vrsta i
- protok zaštitnog plina [Q].

Jakost struje zavarivanja kontrolira penetraciju zavara. Međutim, jakost struje također utječe na napon, na način da se napon povećava s porastom struje kod konstantne dužine električnog luka. Proces se može provoditi s istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Za zavarivanje nehrđajućih čelika se koristi istosmjerna struja s elektrodom na minus polu. Takav način zavarivanja pruža prednosti dublje penetracije i veće brzine zavarivanja pogotovo kada se helij (He) koristi kao zaštitni plin. Brzina zavarivanja utječe na širinu zavara i dubinu penetracije, te je od velike važnosti za ekonomičnost tehnologije zavarivanja. Promjeri elektrode se biraju prema jakosti električne struje. Mogu biti od 0,25 do 6,4 mm te provoditi struje do 1000A jakosti. [7]

Napon između volfram elektrode i radnog komada se najčešće naziva napon električnog luka. Napon električnog luka ovisi o struji zavarivanja, vrhu elektrode, udaljenosti elektrode od radnog komada i vrsti zaštitnog plina. Promjenom dužine električnog luka, uz stalnu jakost struje, utječe se na vrijednost napona električnog luka.

Zaštitna atmosfera kod TIG postupaka zavarivanja su inertni plinovi argon (Ar), helij (He) te njihove mješavine. Dodatno se mogu miješati s vodikom i dušikom radi poboljšanja kvalitete metala zavara. Protok plina ovisi o jačini struje koja se koristi, promjeru elektrode, promjeru sapnice pištolja, te o stupnju mehanizacije/automatizacije tehnologije. Također, protok plina ovisi o uvjetima zavarivanja, tj. da li se zavaruje unutar pogona ili na otvorenom. [7]

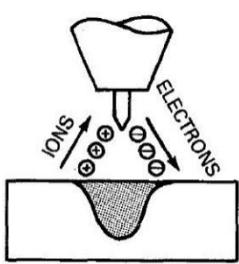
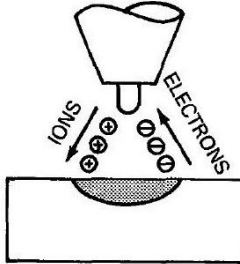
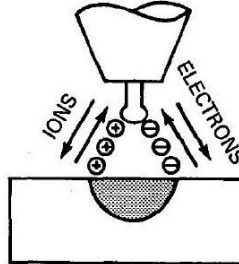



### 3.1.2. Izvori struje

Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest ispravljači, motorgeneratori i transformatori. Izvori struje za zavarivanje nehrđajućih čelika su istosmjerni. Izvori struje za ručno zavarivanje trebaju imati strmo padajuću karakteristiku da se osigura približno konstantna struja zavarivanja neovisno o promjenama dužine luka uslijed pomicanja ruke zavarivača. Kod mehaniziranog zavarivanja gdje je osigurana konstantna dužina luka mogu se primjeniti i izvori s ravnom karakteristikom.

Koristeći istosmjernu struju elektroda može biti spojena na negativni (DCEN) ili pozitivni (DCEP) pol. U skoro svim slučajevima se koristi negativni pol. Na tom polaritetu elektroni putuju s elektrode na radni komad dok pozitivni putuju s radnog komada prema elektrodi. Kad je električni luk na pozitivnom polu smjer elektrona i pozitivnih iona je obrnut.

S DCEN i elektrodom legiranom s 2% torija, 70% topline se generira na radnom komadu što nam omogućava dublju penetraciju. Kada je elektroda na plus polu (DCEP) na površini se javlja efekt katodnog čišćenja. Izmjenična struja se koristi jer kombinira katodno čišćenje površine kad je elektroda na plus polu i duboku penetraciju kad je elektroda na minus polu.

**Tablica 1. Vrste struje i polaritet elektrode kod TIG zavarivanja [7]**

Vrsta struje	DCEN	DCEP	AC
Polaritet elektrode	Negativan	Pozitivan	
Tok elektrona i iona			
Penetracija			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA – pola ciklusa
Omjer topline el. luka	70% na O.M. 30% na elektrodi	30% na O.M. 70% na elektrodi	50% na O.M. 50% na elektrodi
Penetracija	duboka, uska	plitka, široka	srednja
Kapacitet elektrode	Odličan 3.2mm – 400A	Loš 6.4mm – 120A	Dobar 3.2mm – 225A

Uspostavljanje električnog luka pomoću kratkog spoja se izbjegava jer tehnika paljenja zahtjeva kratki spoj između volfram elektrode i metala zavara što omogućava pojavu uključaka volframa u metalu zavara i smanjuje vijek trajanja elektrode.

Drugi način uspostavljanja električnog luka je uz pomoć visokonaponskog visokofrekventnog modula. Pomoću HF modula se uspostavlja visoki napon pri jako visokim frekvencijama, reda nekoliko MHz, da bi se ionizirala atmosfera između elektrode i radnog komada te da bi se upalio električni luk. Na slici 3 je prikazan primjer izvora struje za zavarivanje.



Slika 3. Primjer izvora struje za TIG zavarivanje [16]



### 3.1.3. Pištolj za zavarivanje

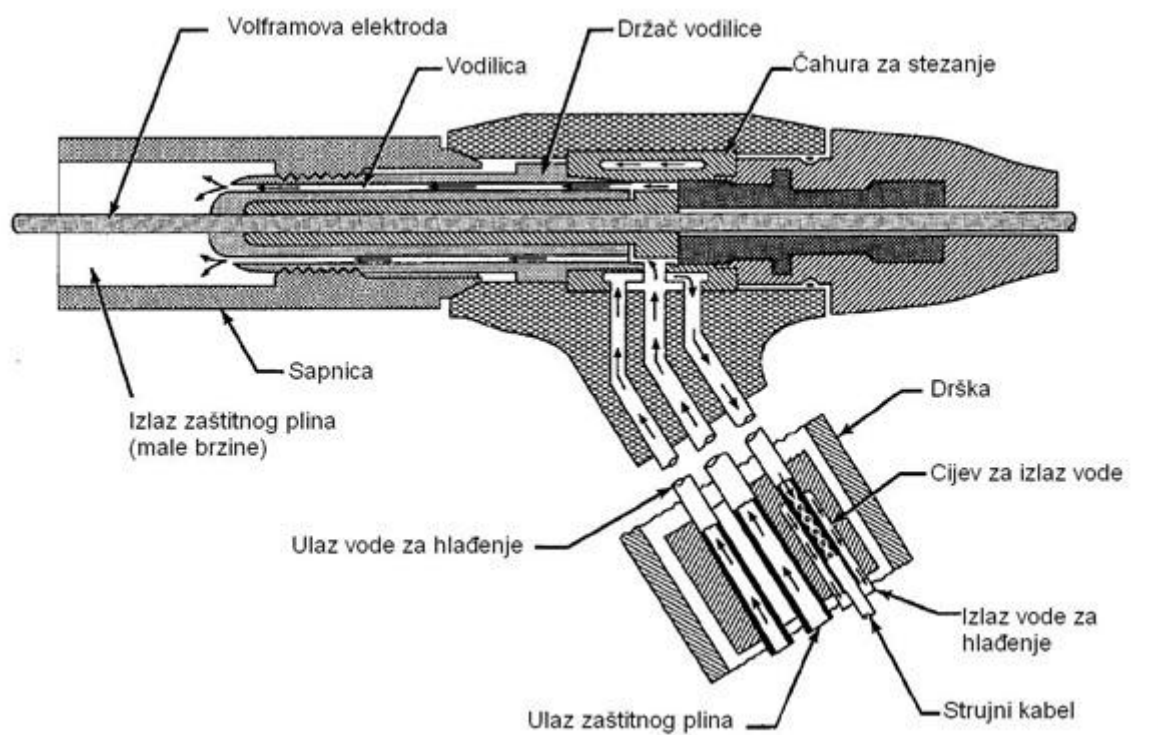
Pištolj za zavarivanje sadrži volfram elektrodu koja dovodi električnu struju za uspostavljanje električnog luka te usmjerava zaštitni plin. Pištolji su podijeljeni po jakosti struje zbog opasnosti od pregrijavanja. Većina pištolja za ručno zavarivanje ima kut nagiba glave pištolja  $120^\circ$ , međutim mogu biti i s drugačijim nagibima ( $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ), (Slika 4). Plinski hlađene pištolje se hladi prolaskom relativno hladnog zaštitnog plina kroz pištolj, ali su ograničeni na jakosti struja do 200A. Vodeno hlađeni pištolji se hlade prolaskom vode kroz kanaliće u držaču pištolja (slika 5). Voda ulazi kroz ulaznu cijev, struji kroz pištolj te izlazi kroz izlaznu cijev. Vodeno hlađeni pištolji se koriste kod većih raspona struja npr. 300 – 500A, ali proizvedeni su i pištolji koji mogu podnositi jakosti struje do 1000A. Ovakvi pištolji se pretežno koriste u automatiziranoj proizvodnji.

**Tablica 2. Vrste pištolja za zavarivanje u ovisnosti o jakosti struje [7]**

Jakosti struja za plisnko/vodeno hlađene TIG pištolje			
Karakteristike	Veličina pištolja		
	Mala	Srednja	Velika
Max. jakost struje [A]	200	200 - 300	500
Vrsta hlađenja	Plin	Voda	Voda
Promjer elektrode [mm]	0,5 – 2,3	1 - 4	1 – 6,35
Promjer sapnice [mm]	6,35 – 15,8	6,35 - 19	9,5 - 20



Slika 4. Varijante TIG pištolja za zavarivanje [8]



Slika 5. Shema TIG pištolja za zavarivanje [7]

### 3.1.4. Elektrode i zaštitni plinovi

Volfram elektroda je netaljiva, no uslijed erozije vrha, te njegovom prljanju u slučaju nehotičnog kontakta s radnim komadom, što se brušenjem mora ukloniti, ona se ipak postupno troši. Talište volframa je  $3410^{\circ}\text{C}$ . Elektrode su klasificirane po legirnim elementima te se identificiraju pomoću boja (slika 6, tablica 3). Čiste volfram elektrode (EWP) sadrže minimalno 99.5% volframa bez dodataka legirnih elemenata. Čiste volfram elektrode se koriste kod nižih struja zavarivanja nego legirane te se pretežno koriste s AC izvorima.

Elektrode legirane s torijem mogu biti legirane s 1% (EWTh-1) ili s 2% (EWTh-2) torijevog oksida  $\text{ThO}_2$ . Elektrode legirane s torijem mogu provoditi 20% jaču električnu struju nego čiste volfram elektrode. Lakše je paljenje luka i luk je stabilniji, a koristi se s DC izvorima.

Elektrode legirane s cerijevim oksidom ( $\text{CeO}_2$ ) i s lantanovim oksidom ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) su se pojavile '80-ih godina u SAD-u jer za razliku od torija nisu radioaktivne. EWCe-2 sadrži 2% cerijevog oksida dok EWLa-1 sadrži 1% lantanovog oksida. Obje se koriste s AC i DC izvorima struje. Elektrode legirane s cirkonijevim oksidom ( $\text{ZrO}_2$ ) su po svojstvima između čistih i elektroda legiranih s torijevim oksidom. [7]



Slika 6. Prikaz volfram elektroda za zavarivanje [19]

Tablica 3. Klasifikacija elektroda [7]

AWS KLASIFIKACIJA	BOJA	LEGIRNI ELEMENT	LEGIRNI OKSID
EWG	Zelena	/	/
EWCe-2	Narančasta	Cerij	CeO <sub>2</sub>
EWL <sub>a</sub> -1	Crna	Lantan	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
EWTh-1	Žuta	Torij	ThO <sub>2</sub>
EWTh-2	Crvena	Torij	ThO <sub>2</sub>
EWZr-1	Smeđa	Cirkonij	ZrO <sub>2</sub>
EWG	Siva	Nije određeno	/

Zaštitni plinovi se koriste za zaštitu elektrode i metala zavara od atmosferskih nečistoća.

Argon i helij te njihove mješavine su najuobičajeniji inertni plinovi za zaštitu. Mješavina argona i vodika se koristi u posebnim slučajevima.

Argon je inertni plin koji se dobiva frakcijskom destilacijom tekućeg zraka. Više se koristi nego helij jer pogoduje tišem radu električnog luka, ima nižu cijenu i pristupačniji je od helija, a teži je od zraka pa su potrebni manji protoci, omogućava lakše paljenje luka i smanjena je penetracija što je osobito važno kod tankih materijala.

Helij je inertni plin lakši od zraka. Pomoću helija električni luk prenosi više topline do radnog komada što je prednost kod materijala s velikom toplinskom provodljivošću te kod brzih mehaniziranih procesa. [7]

Mješavina argona i helija se koristi za iskorištavanje najboljih svojstava jednog i drugog.

Mješavina argona i vodika se koristi u specijalnim slučajevima npr. kod mehaniziranog zavarivanja tankih cijevi od nehrđajućeg čelika. Povećanje brzine zavarivanja je proporcionalno količini vodika u mješavini zbog povećanja napona. Koriste se mješavine argona i do 10% vodika za sve debljine nehrđajućih čelika. Mješavina argona i helija je ograničena na uporabu kod nehrđajućih čelika, legura nikla te legura nikla i bakra.

Odabir protoka zaštitnog plina ovisi o veličini keramičke sapnice, brzini zavarivanja i debljini materijala, ukoliko se radi na otvorenom ovisi i o vjetru. Preveliki protok plina stvara turbulentno strujanje koje onda može usisati atmosferske nečistoće.

Izbor zaštitnog plina ima značajan utjecaj na sljedeće faktore [7]:

- efikasnost zaštite,
- metalurška i mehanička svojstva (gubitak legirnih elemenata, uključci atmosferskih plinova),
- korozijska postojanost (gubitak legirnih elemenata, uključci atmosferskih plinova, površinska oksidacija),
- geometrija zavora,
- površinski izgled (oksidacija, prskanje) i
- stabilnost i paljenje električnog luka.

#### **4. Eksperimentalni dio**

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje karakterističnih spojeva, rubnog, kutnog T-spoja i preklopnog spoja. Osnovni materijal je nehrđajući čelik AISI 304 dimenzija 300x75 mm debljina 2 i 3 mm.

Zavarivano je kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona te mješavine argona i 5% vodika.

Svrha eksperimentalnog dijela je optimizacija parametara u kontekstu ostvarivanja max. brzine zavarivanja, kvalitete i geometrije (oblik, penetracija, estetika) zavarenog spoja.

#### 4.1. Oprema

Prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada korišten je TIG uređaj za zavarivanje, model ESS 211 DTG. (Slika 7).

Uređaj ima mogućnost zavarivanja REL, TIG i TIG impulsnim strujama. Tehnički podatci uređaja su prikazani tablicom 4.

Pistolj za zavarivanje je prikazan slikom 8.



Slika 7. Prikaz uređaja za zavarivanje



Slika 8. Prikaz pištolja za zavarivanje

Tablica 4. Tehnički podatci uređaja ESS 211 DTG [11]

<b>Priključni napon [V]</b>	1/N/PE AC 230
<b>Glavna zaštita (osigurači) [A]</b>	T 16
<b>Raspon struje [A]</b>	3 - 205
<b>Intermitencija 40° C, 50% [A]</b>	205
<b>Intermitencija 40° C, 100% [A]</b>	140
<b>Napon praznog hoda [V]</b>	90
<b>Promjer elektrode [mm]</b>	1,5 - 4,0
<b>Zaštitna klasa</b>	IP23
<b>Masa [kg]</b>	19
<b>Dimenzije [mm]</b>	390 x 260 x 490
<b>Norma izrade</b>	EN 60 974-1

Elektroda korištena pri zavarivanju je volfram elektroda legirana torijevim oksidom promjera 2.4mm. Klasifikacija ove vrste elektrode je EWTh-2 po udjelu torijevog oksida ThO<sub>2</sub> koji iznosi 2%.

Plin korišten za zavarivanje je 100% argon (Ar) te mješavina argona i 5% vodika. Razlog korištenja različitih plinskih zaštitnih atmosfera je da se analizira utjecaj na oblik spoja i parametre zavarivanja, u vidu ostvarivanja usporedbe zaštitne atmosfere.

Za nehrđajući čelik unos topline potrebno je ograničiti do  $Q = 1,5 \text{ kJ/mm}$ . [20]

Formula za izračunavanje unosa topline je:

$$Q_{EL} = \frac{I_z \times U}{v_z \times 1000} \times 60 \times \eta \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right] \quad [18]$$



gdje je :

$Q_{EL}$  – toplina električnog luka [kJ/mm]

$I_z$  – jakost struje zavarivanja [A]

$U$  – napon električnog luka [V]

$v_z$  – brzina zavarivanja [mm/min]

$\eta$  – stupanj iskoristivosti električnog luka prema HRN EN – 1011-1.1988

Stupanj iskoristivosti TIG zavarivanja prema navedenoj normi je  $\eta = 0,6$ .

Kako se pri zavarivanju koriste i impulsne struje potrebno je odrediti prosječnu jakost struje. Rad impulsne vrste struje se zasniva na unosu određene maksimalne struje kratki period vremena, zatim period unosa minimalne jakosti struje, da bi se talina metala zavara mogla hladiti (slika 9). Formula za izračun prosječne jakosti struje je:

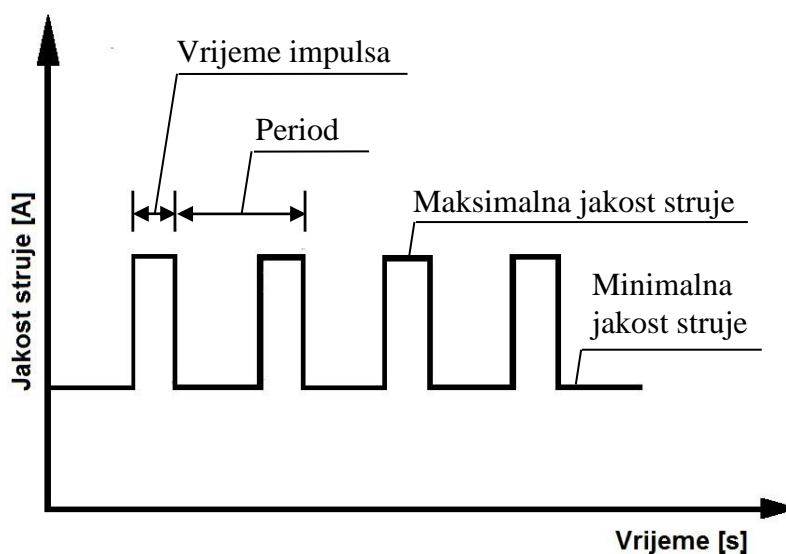
$$I = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

gdje je:

$I$  – prosječna jakost struje [A]

$I_{max}$  – maksimalna jakost struje [A]

$I_{min}$  – minimalna jakost struje [A]



**Slika 9. Impulsna struja zavarivanja**

#### 4.2. Osnovni i dodatni materijal

Osnovni materijal su ploče dimenzija 300 x 75 mm debljina 2 i 3 mm. Osnovni materijal je čelik AISI 304 tj. austenitni nehrđajući čelik. Oznake čelika su prikazane tablicom 5. Udio legiranih elemenata je prikazan tablicom 6.

**Tablica 5. Oznake čelika AISI 304 prema različitim standardima [17]**

NORMA	W. Nr	EN	AISI	UNS	AFNOR	B.S.
OZNAKA	1.4301	X5CrNi18-10	304	S 30400	Z7CN 19-09	304 S15 – 304 S31

**Tablica 6. Udio legiranih elemenata [13]**

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
Maseni udio [%]	0.08	2.00	1.00	18.0- 20.0	8.0-10.5	0.045	0.03

Mehanička, termička i električna svojstva čelika AISI 304 su prikazane tablicom 7.

**Tablica 7. Tehnički podatci od čeliku AISI 304 [13]**

<b>Mehanička svojstva</b>	
Gustoća [ $\times 1000 \text{ kg/m}^3$ ]	8000
Poissonov omjer	0.27-0.30
Modul elastičnosti [ $\text{N/m}^2$ ]	$1,93 \cdot 10^{11}$
Vlačna čvrstoća [ $\text{N/m}^2$ ]	$5,15 \cdot 10^8$
Granica razvlačenja [ $\text{N/m}^2$ ]	$2,05 \cdot 10^8$
Produženje [%]	40
Smanjenje [%]	50
Tvrdoća [HRB]	88
<b>Termička svojstva</b>	
Termička dilatacija [ $\text{K}^{-1}$ ]	0,000016
Toplinska vodljivost [ $\text{W/mK}$ ]	16.2
Specifična toplina [ $\text{J/kgK}$ ]	500
<b>Električna svojstva</b>	
Električni otpor [ $\mu\Omega\text{cm}$ ]	7,20

Dodatni materijal mora biti za klasu kvalitetniji od osnovnog materijala da bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta metala zavaru.

Dodatni materijal korišten prilikom zavarivanja je austenitna čelična šipka kvalitete AISI 316LSi promjera 1.6 mm, klasifikacija EN 12072. Udjeli legirnih elemenata dodatnog materijala su prikazani tablicom 8.

**Tablica 8. Udjeli legirnih elemenata u dodatnom materijalu [14]**

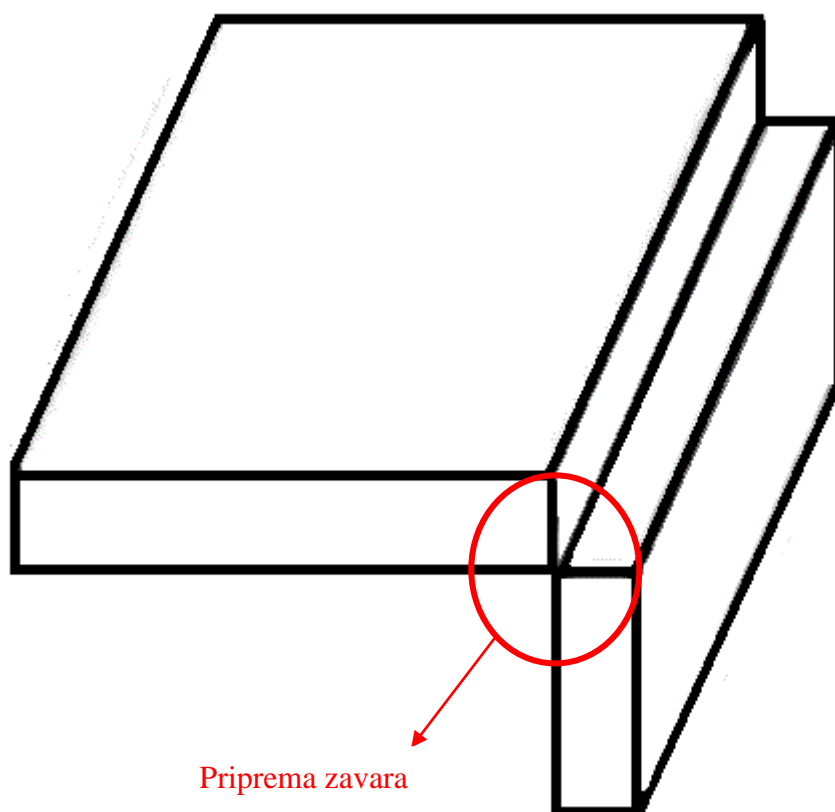
Element	C	Cr	Ni	Mn	Cu	Si	P	S	Mo
Maseni udio [%]	0.03 max	18,5	12,2	1,6	0.75 max	0,8	0,03 max	0,03 max	2,5

### 4.3. Plan pokusa

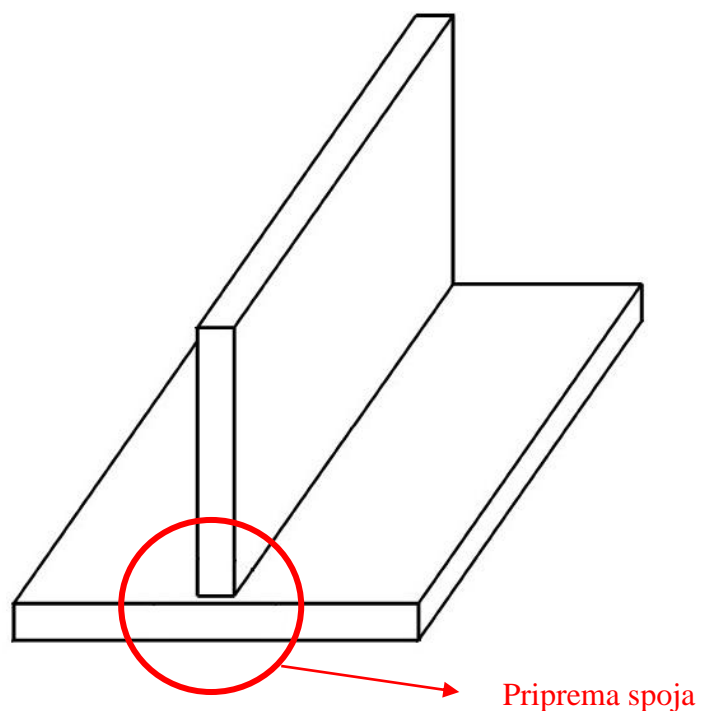
U eksperimentalnom dijelu završnog rada na uzorcima od visokolegiranog austenitnog čelika kvalitete AISI 304 provedeno je zavarivanje TIG postupkom s kontinuiranim i impulsnim strujama.

Ovisno o kemijskim svojstvima te o pripremi spoja zavarivalo se sa ili bez dodatnog materijala. Uzorci su ploče dimenzija 300 x 75 mm debljine 2 i 3 mm. Zavarivani su karakteristični spojevi koji se najčešće primjenjuju u praksi za navedene debljine lima. Odabrani su najpovoljniji parametri zavarivanja u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala, debljini, te pripremi spoja. [10]

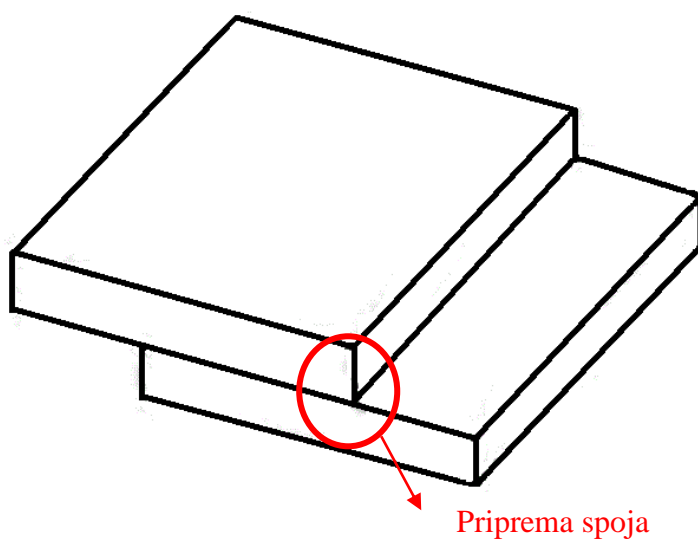
Priprema spojeva su prikazani slikama 10, 11 i 12.



Slika 10. Priprema rubnog spoja



Slika 11. Priprema T-spoja



Slika 12. Priprema rubnog spoja

Uzorci 2a, 2b, 2g i 2h

Priprema spoja je kutni spoj koji je prikazan slikom 13. Razlika uzoraka je u vrsti struje te u zaštitnoj atmosferi. Uzorci 2a i 2b zavareni su pod zaštitnom atmosferom argona, a uzorci 2g i 2h pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika. Koriste se kontinuirane struje, uzorci 2a i 2g, te impulsne struje, uzorci 2b i 2h. Na temelju promijenjenih parametara uspoređuju se kvalitete zavarenih spojeva kako bi se dobili najoptimalniji parametri.

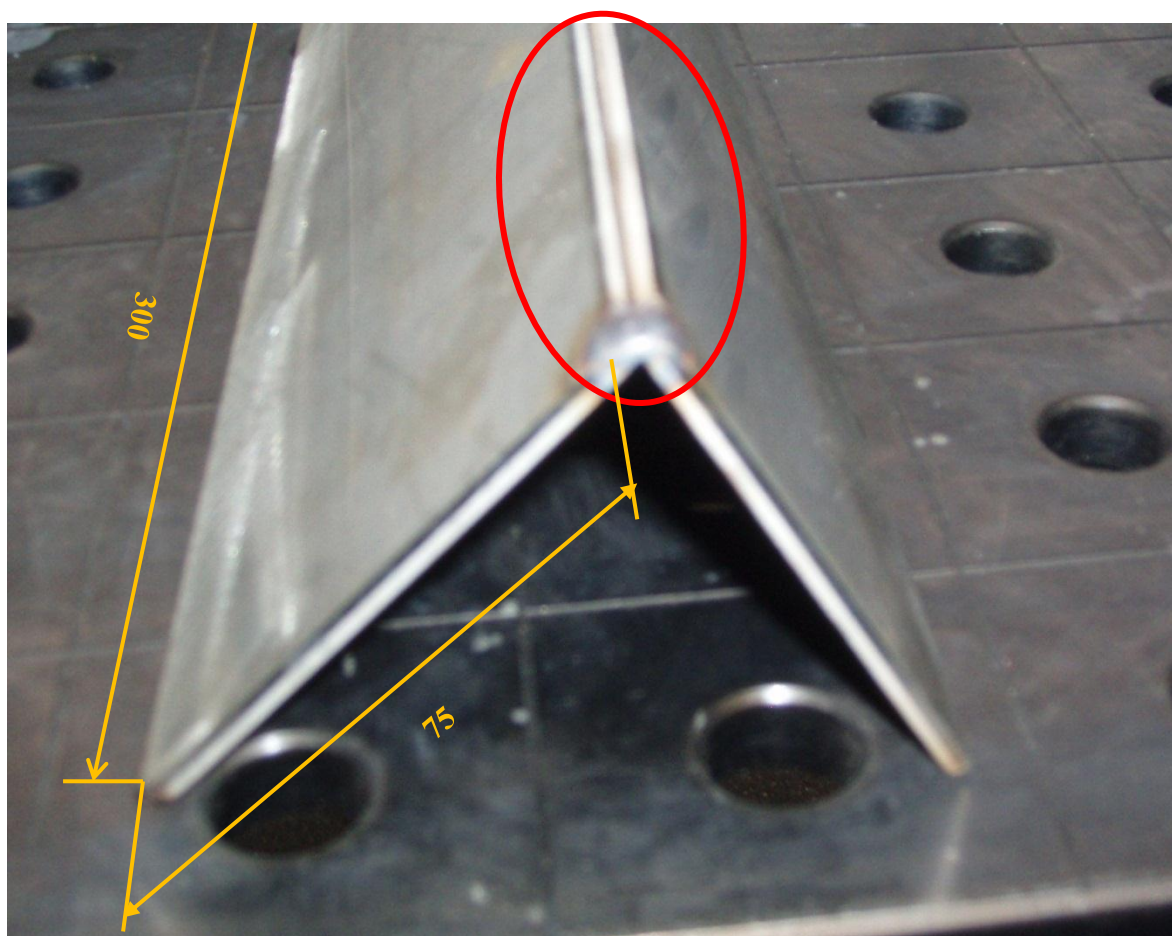
Parametri zavarivanja su prikazani tablicama 9 i 10.

**Tablica 9. Parametri zavarivanja uzoraka 2a i 2b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**

<i>Uzorak</i>	<i>2a</i>	<i>2b</i>
Plin	Ar	Ar
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 80\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 110\text{A}$ ; $I_{\min} = 50\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 10\text{ V}$	$U = 10\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 19\text{ cm/min}$	$v_z = 19\text{ cm/min}$

**Tablica 10. Parametri zavarivanja uzoraka 2g i 2h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

<i>Uzorak</i>	<i>2g</i>	<i>2h</i>
Plin	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 80\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 110\text{A}$ ; $I_{\min} = 50\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 10\text{ V}$	$U = 10\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 30\text{ cm/min}$	$v_z = 30\text{ cm/min}$



**Slika 13. Priprema rubnog spoja uzorka 2a, 2b, 2g i 2h**

Uzorci 2c, 2d, 2i i 2j

Priprema spoja uzoraka 2c i 2d je preklopni spoj (slika 14) koji se zavaruje u zaštitnoj atmosferi argona, bez dodatnog materijala. Na istim tim pločama s druge strane zavareni su uzorci 2i i 2j sa istim parametrima samo u zaštitnoj atmosferi mješavine argona i 5% vodika. Parametri zavarivanja uzoraka su prikazani tablicama 11 i 12.

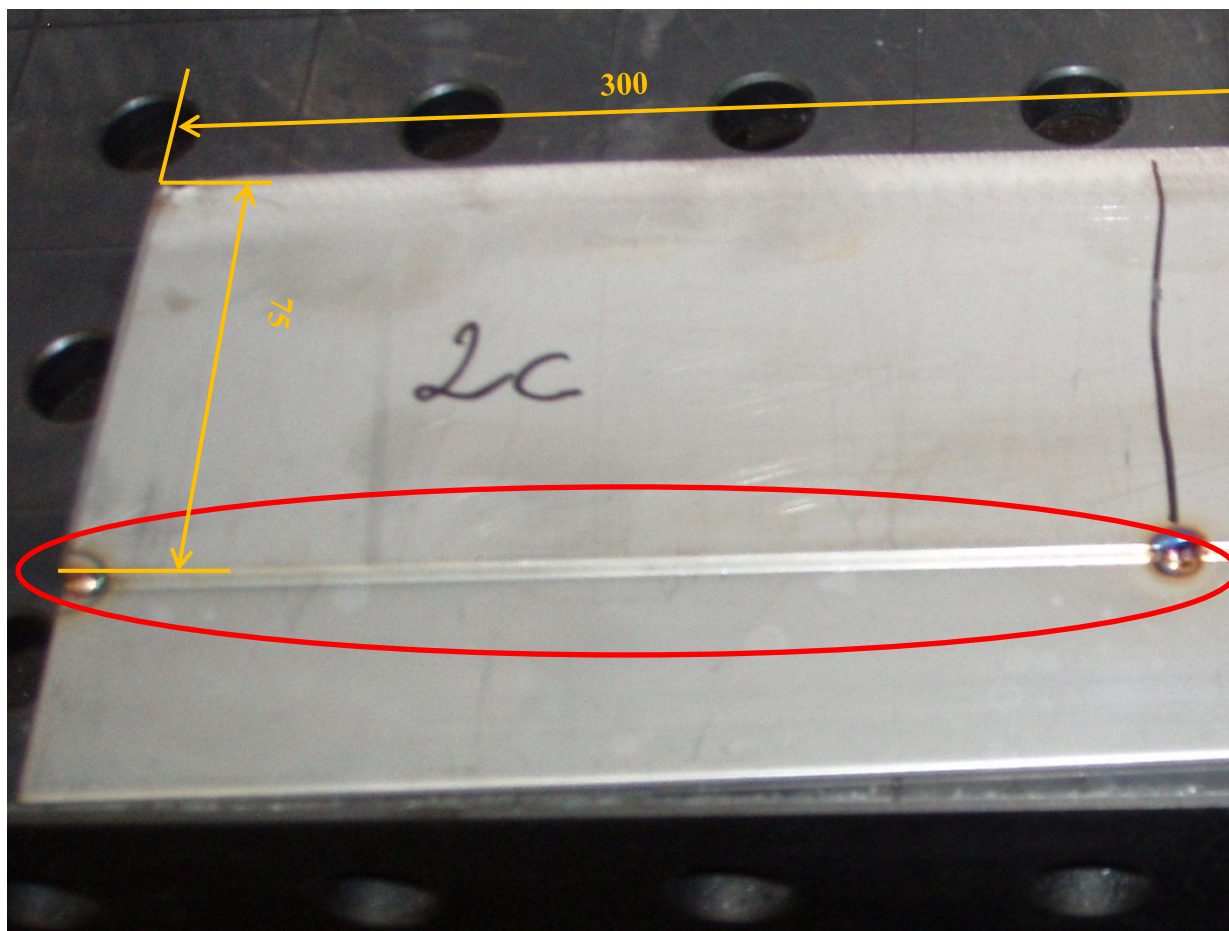
**Tablica 11. Parametri zavarivanja uzoraka 2c i 2d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**

<i>Uzorak</i>	<i>2c</i>	<i>2d</i>
Plin	Ar	Ar
Priprema spoja	Preklopni spoj	Preklopni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 80\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 110\text{A}$ ; $I_{\min} = 50\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 10\text{ V}$	$U = 10\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 16\text{ cm/min}$	$v_z = 16\text{ cm/min}$

**Tablica 12. Parametri zavarivanja uzoraka 2i i 2j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

<i>Uzorak</i>	<i>2i</i>	<i>2j</i>
Plin	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
Priprema spoja	Preklopni spoj	Preklopni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 80\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 110\text{A}$ ; $I_{\min} = 50\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 10\text{ V}$	$U = 10\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 20\text{ cm/min}$	$v_z = 23\text{ cm/min}$





Slika 14. Priprema preklopnog spoja uzoraka 2c, 2d, 2i i 2j

Uzorci 2e, 2f, 2k i 2l

Uzorci 2e, 2f, 2k i 2l zavareni su s dodatnim materijalom. Zbog karakterističnog T-spoja (Slika 15) poželjno je zavarivati s dodatnim materijalom radi ostvarivanja protaljivanja i penetracije, a iz istog razloga je i brzina zavarivanja nešto niža nego kod ostalih uzoraka. Uzorci su zavareni s kontinuiranim i impulsnim strujama te pod zaštitnom atmosferom argona i mješavine argona i 5% vodika.

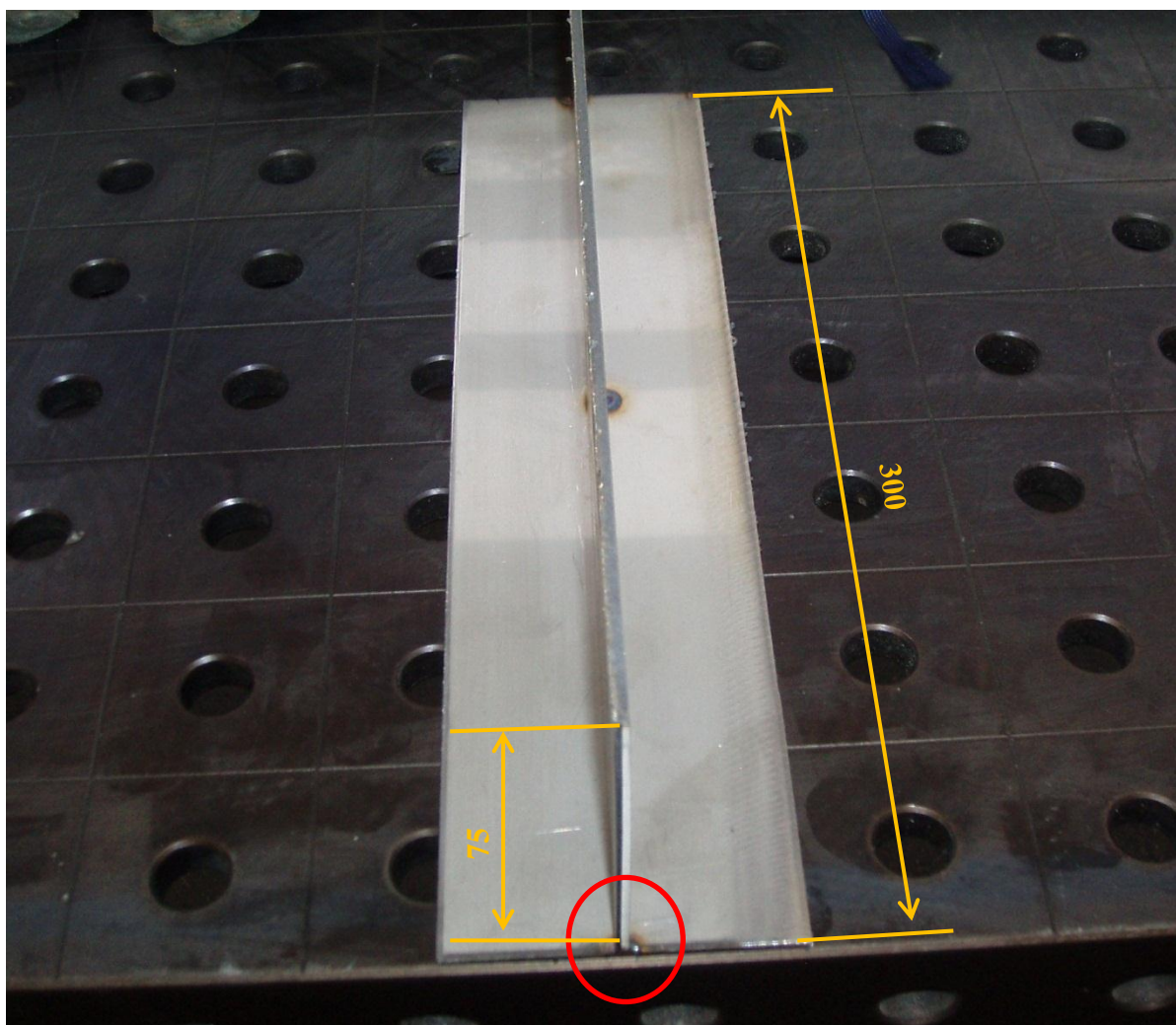
Parametri zavarivanja su prikazani tablicama 13 i 14.

**Tablica 13. Parametri zavarivanja uzoraka 2e i 2f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**

<i>Uzorak</i>	<i>2e</i>	<i>2f</i>
Plin	Ar	Ar
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	S dodatnim materijalom	S dodatnim materijalom
Jakost struje	$I = 80\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 110\text{A}$ ; $I_{\min} = 50\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 10\text{ V}$	$U = 10\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 7,5\text{ cm/min}$	$v_z = 9,2\text{ cm/min}$

**Tablica 14. Parametri zavarivanja uzoraka 2k i 2l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

<i>Uzorak</i>	<i>2k</i>	<i>2l</i>
Plin	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	S dodatnim materijalom	S dodatnim materijalom
Jakost struje	$I = 80\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 110\text{A}$ ; $I_{\min} = 50\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 10\text{ V}$	$U = 10\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 9,6\text{ cm/min}$	$v_z = 9,6\text{ cm/min}$



**Slika 15. Priprema T-spoja uzoraka 2e, 2f, 2k i 2l**

Uzorci 3a, 3b, 3g i 3h

Uzorci 3a, 3b, 3g i 3h su ploče istih dimenzija kao i uzorci 2a, 2b, 2g i 2h, međutim, debljina im je 3 mm. Zbog povećane debljine potreban je i veći unos toplinske energije, koja se zbog dobre toplinske provodljivosti više gubi u materijalu.[9]

Zavareni su rubni spojevi (Slika 16) bez dodatnog materijala, s kontinuiranim i impulsnim strujama i pod zaštitnom atmosferom argona i mješavine argona i 5% vodika.

Parametri zavarivanja su prikazani tablicama 15 i 16.

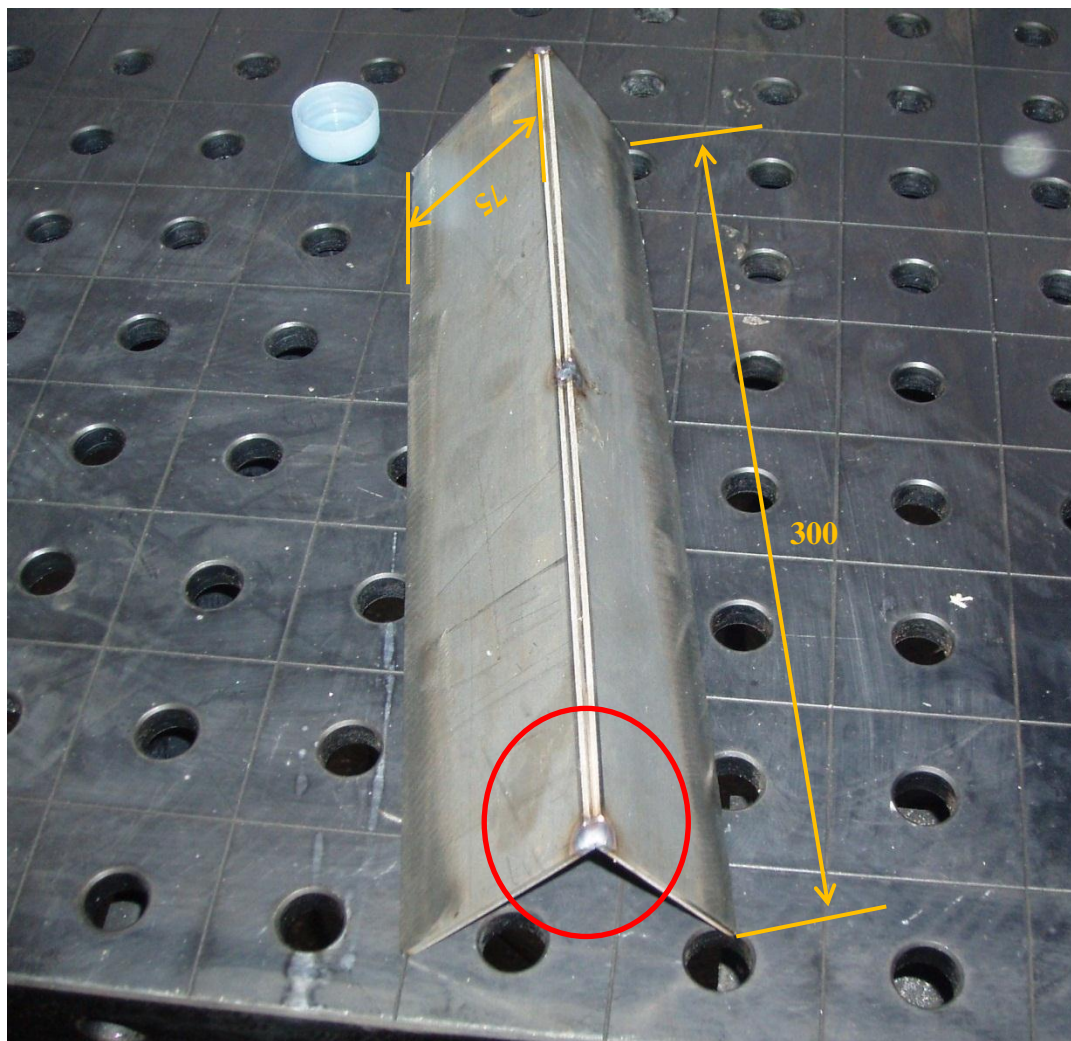
**Tablica 15. Parametri zavarivanja uzoraka 3a i 3b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**

<i>Uzorak</i>	<i>3a</i>	<i>3b</i>
Plin	Ar	Ar
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 120\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 160\text{A}$ ; $I_{\min} = 80\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 12\text{ V}$	$U = 12\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 29\text{ cm/min}$	$v_z = 21\text{ cm/min}$

**Tablica 16. Parametri zavarivanja uzoraka 3g i 3h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

<i>Uzorak</i>	<i>3g</i>	<i>3h</i>
Plin	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 120\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 160\text{A}$ ; $I_{\min} = 80\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 12\text{ V}$	$U = 12\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 30\text{ cm/min}$	$v_z = 29\text{ cm/min}$





Slika 16. Priprema rubnog spoja uzoraka 3a, 3b, 3g i 3h

Uzorci 3c, 3d, 3i i 3j

Preklopni spojevi (Slika 17) uzoraka 3c, 3d, 3i i 3j zavareni su bez dodatnog materijala. Koristila se zaštitna atmosfera argona te mješavina 5% vodika i 95% argona. Uzorci 3c i 3d su prvi zavareni, tek nakon što su se ohladili zavareni su uzorci 3i i 3j s druge strane, da ne bi došlo do deformacija. Na ovim uzorcima su analizirane razlike u kvaliteti zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti struje.

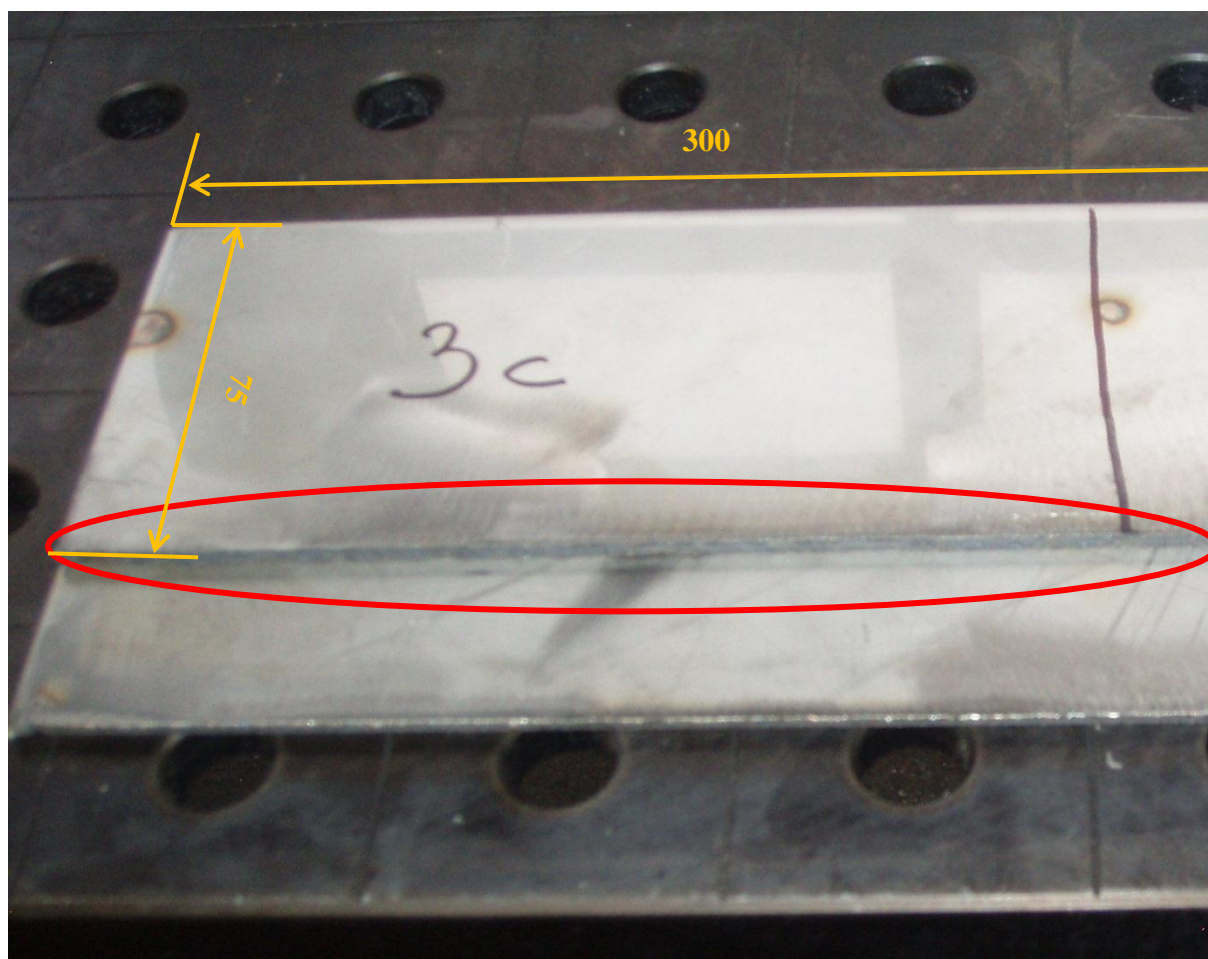
Parametri zavarivanja prikazani tablicama 17 i 18.

**Tablica 17. Parametri zavarivanja uzoraka 3c i 3d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**

<i>Uzorak</i>	<i>3c</i>	<i>3d</i>
Plin	Ar	Ar
Priprema spoja	Preklopni spoj	Preklopni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 120\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 160\text{A}$ ; $I_{\min} = 80\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 12\text{ V}$	$U = 12\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 19\text{ cm/min}$	$v_z = 13,6\text{ cm/min}$

**Tablica 18. Parametri zavarivanja uzoraka 3i i 3j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

<i>Uzorak</i>	<i>3i</i>	<i>3j</i>
Plin	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
Priprema spoja	Preklopni spoj	Preklopni spoj
Dodatni materijal	Bez dodatnog materijala	Bez dodatnog materijala
Jakost struje	$I = 120\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 160\text{A}$ ; $I_{\min} = 80\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 12\text{ V}$	$U = 12\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 25,7\text{ cm/min}$	$v_z = 22\text{ cm/min}$



Slika 17. Priprema preklopnog spoja uzoraka 3c, 3d, 3i i 3j

Uzorci 3e, 3f, 3k i 3l

Kutni T-spoj (slika 18) uzoraka 3e, 3f, 3k i 3l zavaren je s dodatnim materijalom. Isto kao i kod uzoraka 2e, 2f, 2k i 2l brzina zavarivanja je nešto niža nego kod ostalih zbog unosa dodatnog materijala. Navedeni uzorci su također zavareni kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona i mješavine argona i 5% vodika.

Parametri zavarivanja prikazani tablicama 19 i 20.

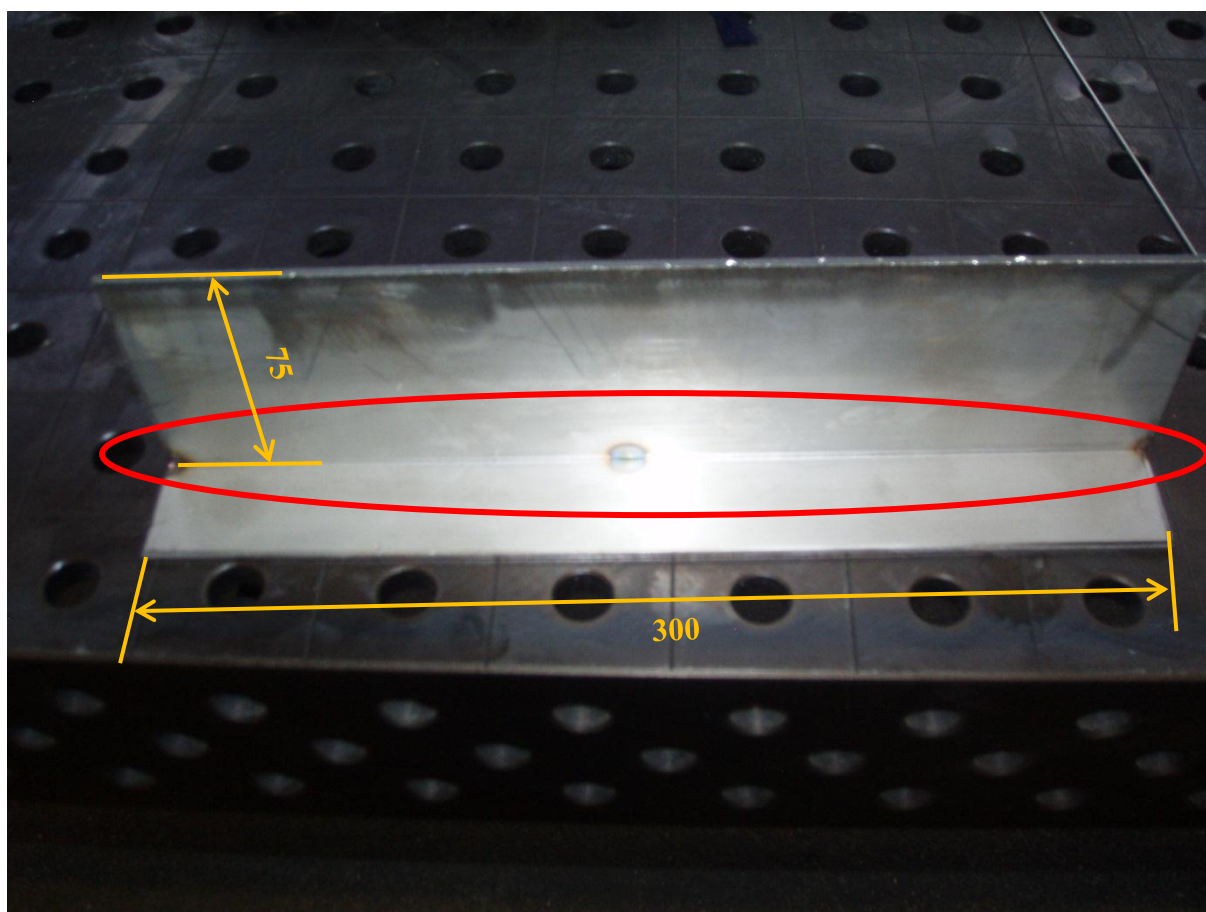
**Tablica 19. Parametri zavarivanja uzoraka 3e i 3f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**

<i>Uzorak</i>	<i>3e</i>	<i>3f</i>
Plin	Ar	Ar
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	S dodatnim materijalom	S dodatnim materijalom
Jakost struje	$I = 120\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 160\text{A}$ ; $I_{\min} = 80\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 12\text{ V}$	$U = 12\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 13\text{ cm/min}$	$v_z = 12\text{ cm/min}$

**Tablica 20. Parametri zavarivanja uzoraka 3k i 3l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

<i>Uzorak</i>	<i>3k</i>	<i>3l</i>
Plin	Ar + 5% $\text{H}_2$	Ar + 5% $\text{H}_2$
Priprema spoja	Kutni spoj	Kutni spoj
Dodatni materijal	S dodatnim materijalom	S dodatnim materijalom
Jakost struje	$I = 120\text{A}$ / kontinuirano	$I_{\max} = 160\text{A}$ ; $I_{\min} = 80\text{A}$ / impulsno
Napon	$U = 12\text{ V}$	$U = 12\text{ V}$
Protok plina	$Q_p = 7\text{ l/min}$	$Q_p = 7\text{ l/min}$
Brzina zavarivanja	$v_z = 21\text{ cm/min}$	$v_z = 17\text{ cm/min}$

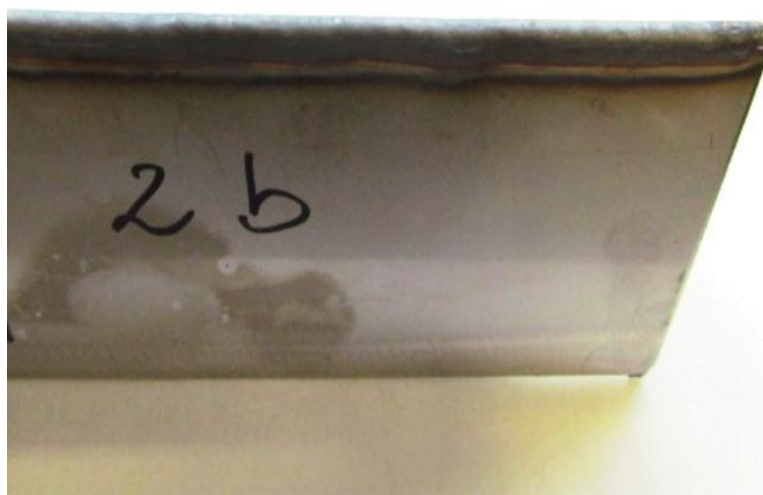




**Slika 18. Priprema T-spoja uzoraka 3e, 3f, 3k i 3l**

#### 4.4. Rezultati

Uzorci 2a, 2b, 2g i 2h



**Slika 19. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 2a i 2b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**



**Slika 20. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 2g i 2h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

Tablica 21. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 2a, 2b, 2g i 2h

UZORAK	2a	2b	2g	2h
JAKOST STRUJE [A]	80	80	Max=110; min=50	Max=110; min=50
SREDNJA VRIJEDNOST JAKOSTI STRUJE [A]	80	80	80	80
VRSTA STRUJE	Kontinuirana	Kontinuirana	Impulsna	Impulsna
NAPON [V]	10	10	10	10
ZAŠTITNI PLIN	Ar	Ar	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
VRIJEME ZAVARIVANJA [s]	47	45	30	29
BRZINA ZAVARIVANJA [mm/min]	191,48	200	300	310,34
Q [kJ/mm]	0,15	0,144	0,096	0,092
ESTETIKA	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava

Tablica 22. Usporedba brzina zavarivanja uzoraka

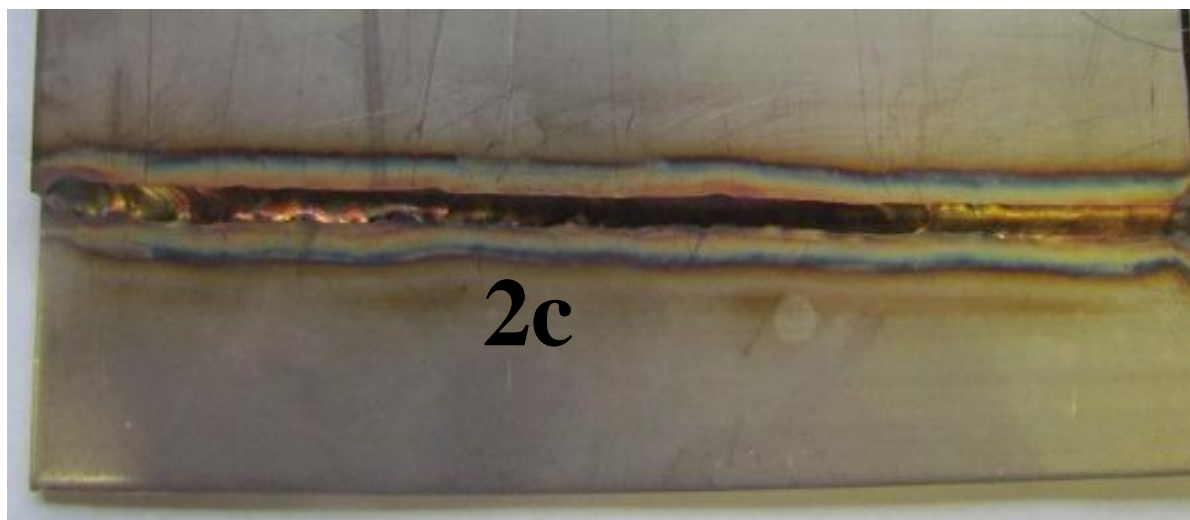
	2a	2b	2g	2h
2a				
2b	+ 4 %			
2g	+ 56 %	+ 50 %		
2h	+ 62 %	+ 55 %	+ 3 %	

Analizom metode zavarivanja navedenih uzoraka zaključuje se da se brzina zavarivanja ne razlikuje značajno kod zavarivanja kontinuiranim strujama od zavarivanja impulsnim strujama (tablica 22).

Estetski, svi uzorci imaju zadovoljavajuću kvalitetu. Zaštitnom atmosferom mješavine argona i vodika se s istim jakostima struje postižu veće brzine zavarivanja (tablica 22). Brzine zavarivanja su veće i do 62%.

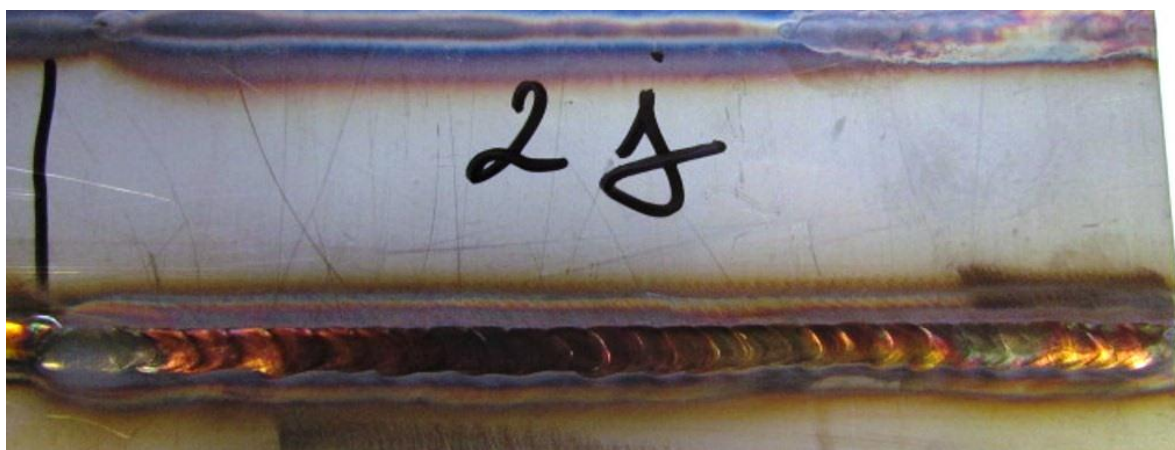
Vizualnom analizom zavarenih spojeva uviđa se da uzorci 2g i 2h imaju manji ZUT nego uzorci 2a i 2b.

Uzorci 2c, 2d, 2i i 2j



**Slika 21. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 2c i 2d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**





**Slika 22. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 2i i 2j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

Tablica 23. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 2c, 2d, 2i i 2j

UZORAK	2c	2d	2i	2j
JAKOST STRUJE [A]	80	80	Max=110; min=50	Max=110; min=50
SREDNJA VRIJEDNOST JAKOSTI STRUJE [A]	80	80	80	80
VRSTA STRUJE	Kontinuirana	Kontinuirana	Impulsna	Impulsna
NAPON [V]	10	10	10	10
ZAŠTITNI PLIN	Ar	Ar	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
VRIJEME ZAVARIVANJA [s]	56	63	45	39
BRZINA ZAVARIVANJA [mm/min]	160,71	142,85	200	230,76
Q [kJ/mm]	0,179	0,201	0,144	0,124
ESTETIKA	Zadovoljava	Zadovoljava	Ne zadovoljava	Zadovoljava

Tablica 24. Usporedba brzina zavarivanja uzoraka

	2c	2d	2i	2j
2c				
2d	- 11 %			
2i	+ 24 %	+ 40 %		
2j	+ 43 %	+ 63 %	+ 15 %	

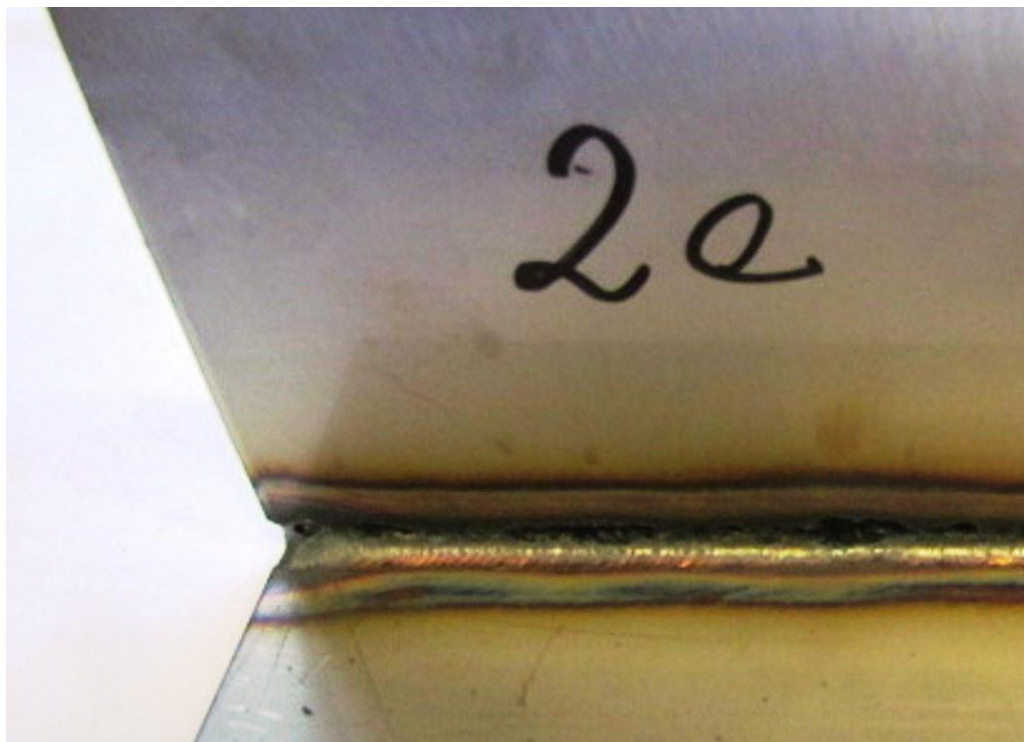


Usporedba brzina zavarivanja je dana tablicom 24, gdje se vidi da se kod uzorka 2d brzina manja za 11% u odnosu na 2c, dok se kod uzorka 2j povećala za 15% u odnosu na 2i.

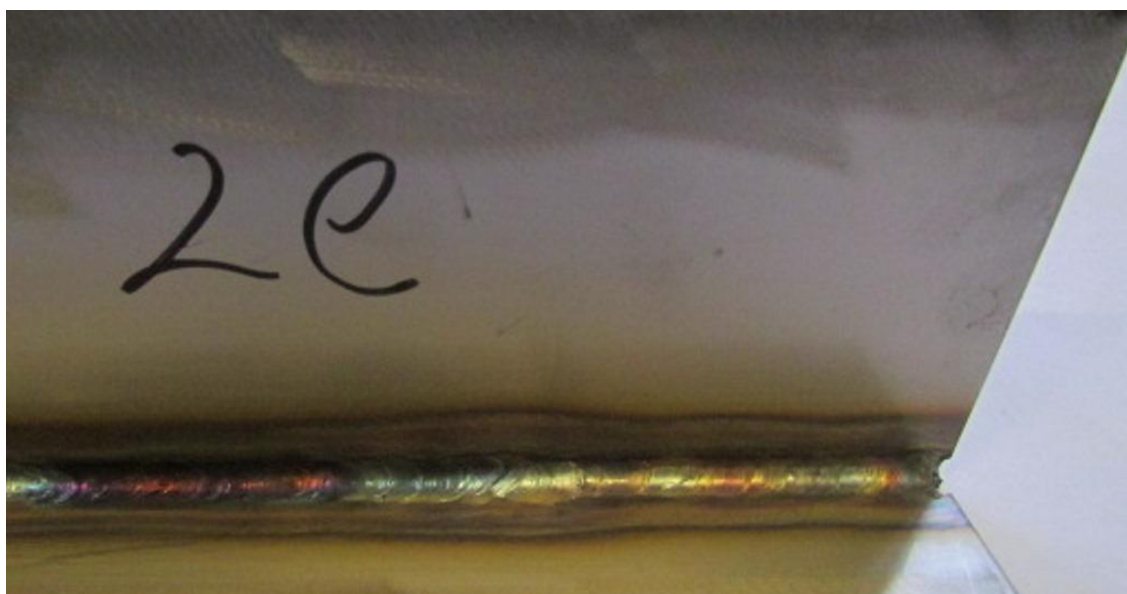
Kod navedenih uzoraka primjetno je i znatno povećanje brzine kod korištenja zaštitne atmosfere mješavine argona i 5% vodika, do 63%.

ZUT je manji kod korištenja mješavine plina argona i 5% vodika zbog većih brzina zavarivanja, a samim time i manje koncentracije toplinske energije na jednom mjestu (tablica 23).

Uzorci 2e, 2f, 2k i 2l



**Slika 23. Uzorci zavarivanja T-spoja 2e i 2f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**



**Slika 24. Uzorci zavarivanja T-spoja 2k i 2l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

Tablica 25. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 2e, 2f, 2k i 2l

UZORAK	2e	2f	2k	2l
JAKOST STRUJE [A]	80	80	Max=110; min=50	Max=110; min=50
SREDNJA VRIJEDNOST JAKOSTI STRUJE [A]	80	80	80	80
VRSTA STRUJE	Kontinuirana	Kontinuirana	Impulsna	Impulsna
NAPON [V]	10	10	10	10
ZAŠTITNI PLIN	Ar	Ar	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
VRIJEME ZAVARIVANJA [s]	119	98	93	92
BRZINA ZAVARIVANJA [mm/min]	75,63	91,83	96,77	97,82
Q [kJ/mm]	0,380	0,313	0,297	0,294
ESTETIKA	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava

Tablica 26. Usporedba brzina zavarivanja

	2e	2f	2k	2l
2e				
2f	+ 21 %			
2k	+ 28 %	+ 5 %		
2l	+ 29 %	+ 6 %	+ 1 %	

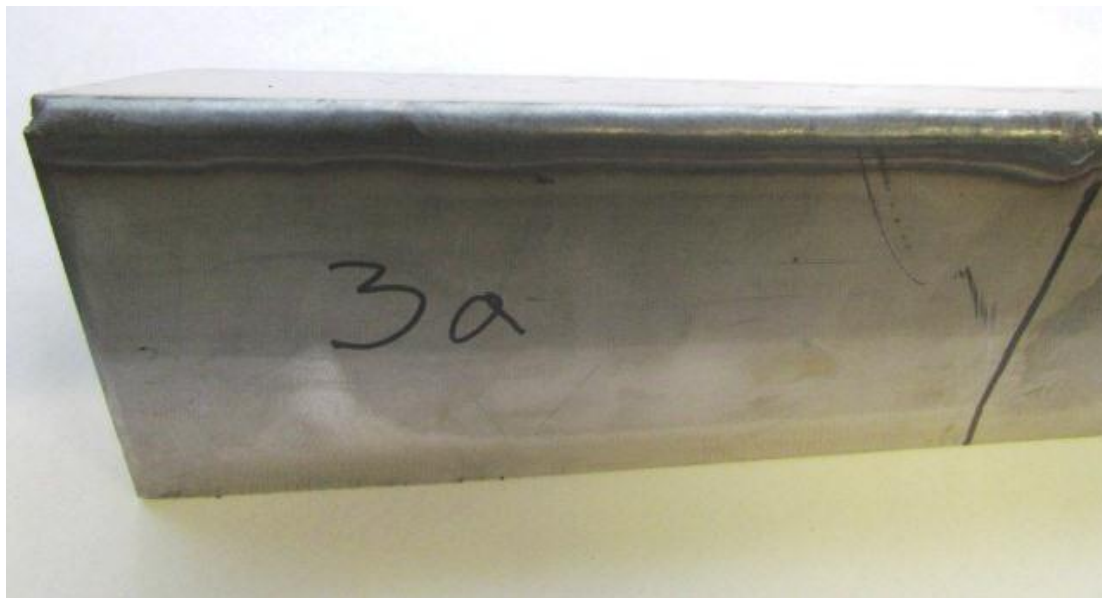
Spoj ovih uzoraka je drugačiji nego kod ostalih jer je potrebno koristiti dodatni materijal.

Zbog unosa dodatnog materijala brzina zavarivanja je značajno smanjena u odnosu na druge uzorke (tablica 25).

Usporedba brzina zavarivanja je dana tablicom 26.

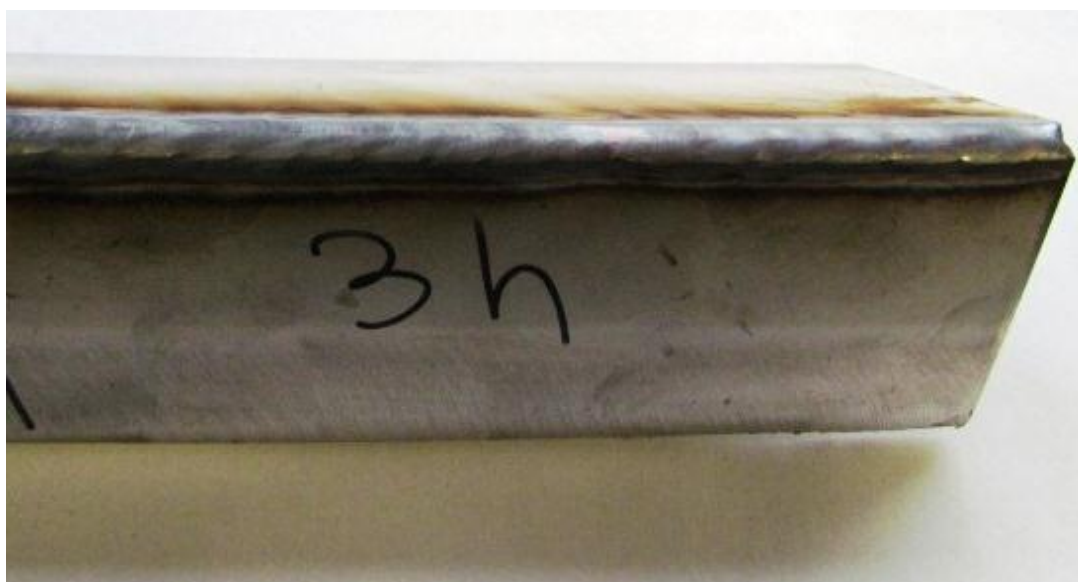
Sama estetika metala zavora je kod svih uzoraka zadovoljavajuća.

Uzorci 3a, 3b, 3g i 3h



**Slika 25. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 3a i 3b, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**





**Slika 26. Uzorci zavarivanja rubnog spoja 3g i 3h, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

Tablica 27. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 3a, 3b, 3g i 3h

UZORAK	3a	3b	3g	3h
JAKOST STRUJE [A]	120	120	Max=160; min=80	Max=160; min=80
SREDNJA VRIJEDNOST JAKOSTI STRUJE [A]	120	120	120	120
VRSTA STRUJE	Kontinuirana	Kontinuirana	Impulsna	Impulsna
NAPON [V]	12	12	12	12
ZAŠTITNI PLIN	Ar	Ar	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
VRIJEME ZAVARIVANJA [s]	31	42	29	31
BRZINA ZAVARIVANJA [mm/min]	290,32	214,28	310,34	290,32
Q [kJ/mm]	0,178	0,241	0,167	0,178
ESTETIKA	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava

Tablica 28. Usporedba brzina zavarivanja

	3a	3b	3g	3h
3a				
3b	- 26 %			
3g	+ 6 %	+ 44 %		
3h	0 %	+ 35 %	- 6 %	



Zavarivanje uzoraka od 3 mm zahtjeva veće struje zavarivanja kako bi se ostvarila bolja penetracija tj. protaljivanje. Za povećani unos toplinske energije, zbog povećane debljine osnovnog materijala, dobila se zadovoljavajuća estetska zavarenog spoja.

Brzina zavarivanja pod zaštitnom atmosferom argona s kontinuiranim strujama je  $3a = 290$  mm/min, a s impulsnim strujama  $3b = 214$  mm/min što je manje za 26% u odnosu na  $3a$ . Kod zavarivanja pod zaštitnom atmosferom mješavine plinova se uočila manja razlika u brzinama zavarivanja između uzoraka  $3g$  i  $3h$ .

Usporedbe brzina zavarivanja su dane tablicom 28.

Uzorci 3c, 3d, 3i i 3j



**Slika 27. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 3c i 3d, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**



**Slika 28. Uzorci zavarivanja preklopnog spoja 3i i 3j, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**

**Tablica 29. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 3c, 3d, 3i i 3j**

UZORAK	3c	3d	3i	3j
JAKOST STRUJE [A]	120	120	Max=160; min=80	Max=160; min=80
SREDNJA VRIJEDNOST JAKOSTI STRUJE [A]	120	120	120	120
VRSTA STRUJE	Kontinuirana	Kontinuirana	Impulsna	Impulsna
NAPON [V]	12	12	12	12
ZAŠTITNI PLIN	Ar	Ar	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
VRIJEME ZAVARIVANJA [s]	47	66	34	41
BRZINA ZAVARIVANJA [mm/min]	191,48	136,36	264,7	219,51
Q [kJ/mm]	0,270	0,380	0,195	0,236
ESTETIKA	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava

**Tablica 30. Usporedba brzina zavarivanja**

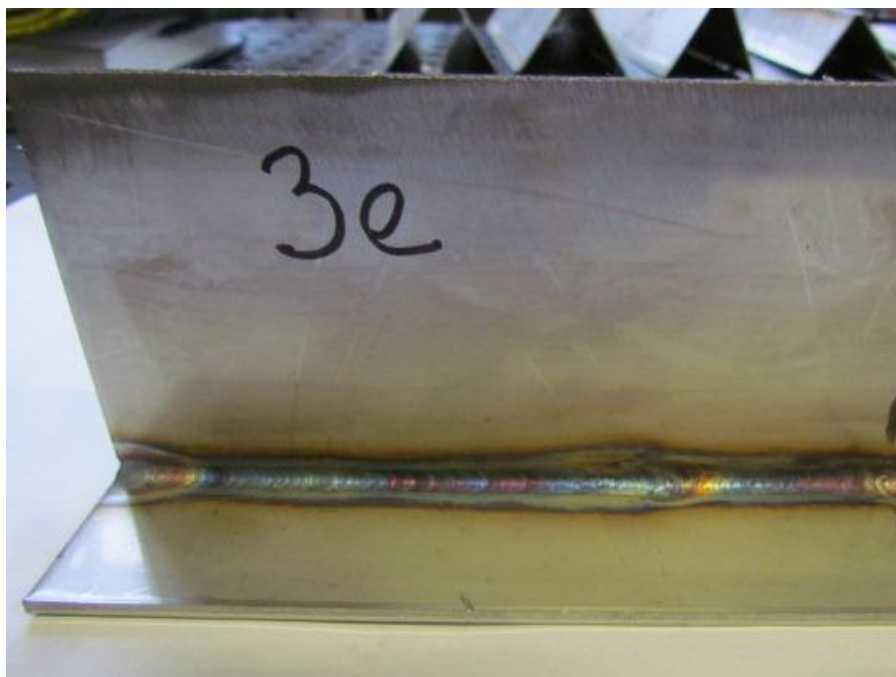
	3c	3d	3i	3j
3c				
3d	- 29 %			
3i	+ 38 %	+ 94 %		
3j	+ 14 %	+ 60 %	- 17 %	

Kod preklopnog spoja uzoraka od 3 mm kao i kod uzoraka od 2 mm, puno bolja estetska svojstva, pokazuju uzorci zavareni impulsnim strujama.

Uzorci zavareni pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika imaju manji ZUT zbog povećanja brzine zavarivanja što smanjuje koncentraciju toplinske energije (tablica 29).

Brzina zavarivanja uzorka 3i se povećala za 95% usporedno s uzorkom 3d. Usporedba brzina zavarivanja su dana tablicom 30.

Uzorci 3e, 3f, 3k i 3l



**Slika 29. Uzorci zavarivanja T-spoja 3e i 3f, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom argona**



**Slika 30. Uzorci zavarivanja T-spoja 3k i 3l, kontinuiranim i impulsnim strujama pod zaštitnom atmosferom mješavine argona i 5% vodika**



**Tablica 31. Analiza rezultata zavarivanja uzoraka 3e, 3f, 3k i 3l**

UZORAK	3e	3f	3k	3l
JAKOST STRUJE [A]	120	120	Max=160; min=80	Max=160; min=80
SREDNJA VRIJEDNOST JAKOSTI STRUJE [A]	120	120	120	120
VRSTA STRUJE	Kontinuirana	Kontinuirana	Impulsna	Impulsna
NAPON [V]	12	12	12	12
ZAŠTITNI PLIN	Ar	Ar	Ar + 5% H <sub>2</sub>	Ar + 5% H <sub>2</sub>
VRIJEME ZAVARIVANJA [s]	69	73	42	53
BRZINA ZAVARIVANJA [mm/min]	130,43	123,28	214,28	169,81
Q [kJ/mm]	0,397	0,420	0,241	0,305
ESTETIKA	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava	Zadovoljava

**Tablica 32. Usporedba brzina zavarivanja**

	3e	3f	3k	3l
3e				
3f	- 5 %			
3k	+ 64 %	+ 73 %		
3l	+ 30 %	+ 37 %	- 20 %	



Za zavarivanje navedenih uzoraka korišten je dodatni materijal, što je dodatno smanjilo brzinu zavarivanja kod korištenja argona kao zaštitnog plina. Brzina zavarivanja uzoraka 3e = 130 mm/min i 3f = 123 mm/min (tablica 31).

Korištenjem impulsnih struja i dodatnog materijala, ZUT je veći nego kod korištenja kontinuiranih struja.

## 5. ZAKLJUČAK

Razvitak i proizvodnja korozijski postojanih Cr-Ni čelika tijekom 20. stoljeća omogućili su mnogim kompleksnim granama industrije daljnji razvitak i usavršavanje postojećih postupaka proizvodnje. Međutim, omogućili su i razvijanje novih postupaka i tehnologija koji su bili ograničeni upravo nepostojanjem odgovarajućih materijala, koji bi posjedovali povišena svojstva korozijske otpornosti, uz istovremeno dobra mehanička svojstva i svojstva zavarljivosti.

Kako bi se postigla odgovarajuća korozijska otpornost zavarenog spoja potrebno je tijekom cijelog procesa zavarivanja, počevši od pripreme spoja, odabira postupka i parametara zavarivanja, zaštitnih i pomoćnih plinova, kao i odgovarajućeg dodatnog materijala uvažavati pojedine specifične zahtjeve ovih skupina konstrukcijskih materijala.

Ovi materijali se zavaruju bez značajnijih poteškoća ukoliko se uvažavaju njihove specifičnosti poput npr. izražene sklonosti deformacijama, kao posljedica unosa topline tijekom zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada zavareni su karakteristični spojevi (rubni, preklopni i kutni T-spoj). Promjenjivi su parametri plinova i vrsta struja, a konstantni jakost struje, napon i protok plina. Korištene su zaštitne atmosfere argona i mješavine argona i 5% vodika. Vrste struja su kontinuirane i impulsne.

Za nehrđajuće čelike, unos topline je potrebno ograničiti do  $Q = 1,5 \text{ kJ/mm}$ . Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se primjenom parametara zavarivanja iz tablica (21, 23, 25, 27, 29 i 31) ne približavamo graničnoj vrijednosti maksimalnog unosa topline u radni komad. Dakle, primjenom tih parametara zavarivanja ne narušava se kemijski sastav i svojstva nehrđajućeg čelika, koje taj materijal posjeduje prije zavarivanja.

Konačno, analizom dobivenih rezultata dolazi se do zaključka da se upotrebom mješavine argona i 5% vodika postižu brzine zavarivanja i do 60% veće nego kod korištenja argona kao zaštitne atmosfere. Međutim, kod korištenja impulsnih struja, metal zavara ima bolja estetska svojstva u odnosu na kontinuirane struje.

## LITERATURA

- [1] Spaehn H.: „Performace Requirements of Stainless Steel in the Chemical Process Industry“. Metal Progress-2, 1979.
- [2] Juraga I.: „Zavarivanje čelika otpornih na koroziju“, Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [3] Lippold J.C., Kotecki D.J. : „Welding Metallurgy and Weldability Of Stainless Steels“, 2005.
- [4] Andrić Š., Juraga I., Grubić K., Jarić M.: „Visokolegirani martenzitni čelici i neki problemi pri njihovom zavarivanju“, Časopis Zavarivanje, veljača, 1988.
- [5] Kearns W. H.: „Welding Handbook, Materials and their weldability, seventh edition, vol.4“
- [6] Kralj S., Andrić Š.: „Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka“, Zagreb, 1992.
- [7] O'Brien R. L.: „Welding Handbook, Welding processes, eighth edition, vol.2“, Miami, 1991.
- [8] <http://www.neotech-weld.com/images/ttk%20tig%20torches%20%200.gif> , 25.1.2012.
- [9] Kraut B.: „Strojarski priručnik“, Zagreb, 1982.
- [10] „The Procedure Handbook of Arc Welding, twelfth edition“, Lincoln Electric, Cleveland-Ohio, lipanj 1973.
- [11] [http://www.ess-schweisstechnik.de/de/produkte/wig/gleichstrom/211\\_dtg,31,3,12,47.php](http://www.ess-schweisstechnik.de/de/produkte/wig/gleichstrom/211_dtg,31,3,12,47.php), 2.2.2012
- [12] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I.: „Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje“, Pula, 2007.
- [13] [http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless\\_steels/show\\_stainless.cfm?id=aisi\\_type\\_304&prop=all&page\\_title=aisi%20type%20304](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?id=aisi_type_304&prop=all&page_title=aisi%20type%20304), 3.2.2012
- [14] [http://www.harrisproductsgroup.com/~media/Files/PDF/Spec%20Sheets/Welding/Stainless%20Steel/316LSi\\_SS-WeldingWireSpec.ashx](http://www.harrisproductsgroup.com/~media/Files/PDF/Spec%20Sheets/Welding/Stainless%20Steel/316LSi_SS-WeldingWireSpec.ashx), 3.2.2012
- [15] <http://netspaw.pl/files/spawarki-tig.png>, 8.2.2012

- 
- [16] [http://newsroom.lincolnelectric.com/images/9026/media\\_gallery/SquareWaveTIG175237C9B72\\_high.jpg](http://newsroom.lincolnelectric.com/images/9026/media_gallery/SquareWaveTIG175237C9B72_high.jpg) 8.2.2012
- [17] Meštrić B.: „Hrvatske norme (HRN EN) za dodatne materijale za zavarivanje nehrđajućih čelika“, Zbornik radova, Spajanje korozijski postojanih materijala, Opatija, 2003.
- [18] Keretić D., Mesić D.: „Primjena dupleks čelika u održavanju sustava za proizvodnju i transport plina“, Zbornik radova, Spajanje korozijski postojanih materijala, Opatija, 2003.
- [19] <http://image.classictrucks.com/f/33796006/1110clt-06-o-+basic-tig-welding-101-with-inverter-machines+electrodes.jpg>, 12.2.2012
- [20] Holmberg G.: „Stainless Steels – Their properties and their suitability for welding“, Avesta Welding, Information 8838, Geilo, 1986.